



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Επίδραση Εφαρμογής Ευφυών Κεραιοσυστημάτων Ενεργών  
Παρασιτικών Στοιχείων σε Κυψελωτά Ασύρματα**

**Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Απόστολος Ι. Σωτηρίου**

Αθήνα, Οκτώβριος 2008





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Επίδραση Εφαρμογής Ευφυών Κεραιοσυστημάτων Ενεργών

### Παρασιτικών Στοιχείων σε Κυψελωτά Ασύρματα

### Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα

### ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Συμβουλευτική επιτροπή:** Χρήστος Καψάλης  
Παναγιώτης Κωττής  
Ιωάννης Κανελλόπουλος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 14/12/2005.

.....  
Χ. Καψάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Π. Κωττής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ι. Κανελλόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Φ. Κωνσταντίνου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Σ. Κωτσόπουλος  
Αν. Καθηγητής Παν. Πατρών

.....  
Γ. Φικιώρης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....

.....  
Απόστολος Ι. Σωτηρίου  
Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Απόστολος Ι. Σωτηρίου, 2008.  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.





*Στην οικογένειά μου και όσους  
πίστεψαν σε εμένα*





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η μελέτη της επίδρασης από την εφαρμογή των ευφών κεραιοσυστημάτων ενεργών/παρασιτικών στοιχείων σε ασύρματα κυψελωτά δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Εκτεταμένες έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με τη διαφοροποίηση που θα επέλθει στα ασύρματα δίκτυα από μια πιθανή αντικατάσταση των συμβατικών κεραιοσυστημάτων με κεραιοσυστήματα μεταβαλλόμενων χαρακτηριστικών ακτινοβολίας. Η διαφαινόμενη αλλαγή στη δομή και φιλοσοφία λειτουργίας των κεραιοσυστημάτων πηγάζει από τις επιτακτικές ανάγκες για την ταυτόχρονη υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών υψηλού ρυθμού δεδομένων, το συνεχώς αυξανόμενο πλήθος των χρηστών και το εξαιρετικά υψηλό επίπεδο στην ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών που πρέπει να διατηρηθεί.

Αρχικά περιγράφεται η εξέλιξη των ευφών κεραιοσυστημάτων και γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στις στοιχειοκεραίες ενεργών και παρασιτικών στοιχείων με ηλεκτρονικά ελεγχόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας. Επίσης, παρουσιάζονται αναλυτικά τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη εφαρμογή των ήδη χρησιμοποιούμενων ευφών κεραιών σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και αναφέρονται τα αποτελέσματα από πιλοτικές εφαρμογές που έχουν πραγματοποιηθεί σε ενεργά δίκτυα τηλεφωνίας.

Τα ευφυή κεραιοσυστήματα λειτουργούν και ως προσαρμοζόμενα φίλτρα με στόχο την αντιμετώπιση ισχυρών σημάτων παρεμβολής. Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη λειτουργία είναι σημαντικά καθώς βελτιώνεται η επικοινωνία στο τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Με τη χρήση μεθόδων εκτίμησης γωνιών άφιξης σημάτων (Direction-of-Arrival DoA) η αποτελεσματικότητα των συγκεκριμένων κεραιοσυστημάτων βελτιστοποιείται καθώς γίνονται γνωστά επιπλέον στοιχεία του τηλεπικοινωνιακού καναλιού και ρυθμίζεται αντίστοιχα η εκπομπή και λήψη. Δύο τέτοιες μέθοδοι προσαρμοσμένες για κεραιοσυστήματα επιλογή δέσμης με παρασιτικά και ενεργά στοιχεία παρουσιάζονται και αξιολογούνται. Επίσης, ίδιου τύπου κεραιοσυστήματα θεωρήθηκαν αρχικά σε ασύρματο κυψελωτό δίκτυο στενού εύρους και εν συνεχεία σε ευρυζωνικό δίκτυο σημείου προς πολλαπλά σημεία. Η επίδραση στο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο αξιολογήθηκε με βάση το ρυθμό λαθών (Bit-Error-Ratio BER) καθώς και το λόγο επιθυμητού σήματος προς παρεμβολές (Carrier-Interference Ratio CIR) τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη. Τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη περίπτωση, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την αναγκαιότητα μετάβασης από τα συμβατικά κεραιοσυστήματα, σε ευφυή.

**Λέξεις κλειδιά:** Ευφυή Κεραιοσυστήματα, Κεραιοσυστήματα Επιλογής Δέσμης Ενεργών Παρασιτικών Στοιχείων, Αλγόριθμος Εκτίμησης Γωνίας Άφιξης, Ρυθμός Λαθών, Λόγος Σήματος προς Παρεμβολές.



## ABSTRACT

The main subject of the present thesis is the impact of deploying switched parasitic planar array smart antenna in wireless telecommunications systems. A wide ongoing research is related to the possible benefits from the mass replacement of conventional antennas with smart ones. The extensive studies in this domain stem from the necessity for simultaneous support of high-rate services, new broadband services, demand for improved quality of service, increased number of heavy users and increased per user capacity.

At first, a brief analysis is given regarding the evolution of wireless networks, the different technologies used, new trends and the global subscriber's augmentation. In the following, the kinds and operation principles of smart antennas are presented. The main focus is on switched parasitic planar arrays with electrically controllable radiation patterns, a recently developed antenna that presents simple structure and low cost.

Results from trial deployment of commercially available smart antennas to wireless networks are presented and furthermore the advantages offered by their incorporation are discussed.

Adaptive antennas are used as adjustable filters in order to suppress any incoming interfering signals. With the use of Direction-of-Arrival algorithms, several characteristics of the communication channel can be exploited in order to optimize the communication between the transmitter and receiver. Two such methods adjusted for switched parasitic planar arrays are presented with the relevant simulation results.

In the present thesis, switched parasitic planar array antennas have been assumed installed in base stations of a wireless cellular telephony network and also in stations of a broadband point to multipoint network. The evaluation of the simulated deployment was based on the Bit-Error-Ratio BER measurements as well as on the uplink and downlink Carrier-Interference Ratio CIR measurements. In both scenarios, it is concluded that the implementation of a switch parasitic planar array instead of a conventional antenna is beneficial for both operators and subscribers.

Key words: Smart Antennas, Switched Parasitic Planar Arrays, Direction-of-Arrival Algorithm, Bit-Error-Ratio, Carrier-Interference Ratio



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ευφυή κεραιοσυστήματα αποτελούν την τελευταία δεκαετία αντικείμενο συστηματικής μελέτης σε πολλούς κλάδους των τηλεπικοινωνιών. Οι μεγάλες ανάγκες σε χωρητικότητα και οι λιγοστοί διαθέσιμοι πόροι που έχουν απομείνει στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, ώθησαν την ανάπτυξη των ευφών κεραιών. Ευρυζωνικές υπηρεσίες και αυξημένοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων συνέτειναν στην ανάπτυξη νέων μεθόδων για τη βελτίωση της απόδοσης των ασυρμάτων δικτύων επικοινωνίας. Μία ευφυής κεραία, αποτελείται από αριθμό στοιχειωδών κεραιών, τοποθετημένων σε συγκεκριμένες θέσεις στο χώρο και έχει την ικανότητα να μεταβάλλει δυναμικά το διάγραμμα ακτινοβολίας της, ανάλογα με το περιβάλλον διάδοσης και τη θέση που έχουν οι χρήστες ενδιαφέροντος αλλά και οι χρήστες μη ενδιαφέροντος. Ο όρος "ευφυής" δεν αποδίδεται σε αυτή καθ' αυτή την κεραία αλλά στη δυνατότητα που έχει να τροποποιεί το διάγραμμα ακτινοβολίας, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Η μονάδα επεξεργασίας σήματος και τα ψηφιακά κυκλώματα που την υποστηρίζουν, δίνουν τη δυνατότητα στο ευφές κεραιοσύστημα να μεταδίδει και να λαμβάνει με χωρικά προσαρμοσμένο τρόπο. Ουσιαστικά, μεταβάλλεται η κατευθυντικότητα του συστήματος, ανάλογα με τα αποτελέσματα της μονάδας επεξεργασίας σημάτων.

Η ικανότητα μεταβολής του διαγράμματος ακτινοβολίας οδηγεί σε μεγιστοποίηση του κέρδους προς την κατεύθυνση των χρηστών ενδιαφέροντος με ταυτόχρονη καταπίεση των σημάτων από ανεπιθύμητους χρήστες που αντιμετωπίζονται ως παρεμβολείς. Η παραπάνω διαδικασία συμβάλλει στην αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος (μεγαλύτερος αριθμός χρηστών) και στην επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων. Θα πρέπει να τονιστεί ότι με τη χρησιμοποίηση ευφών κεραιών, αντιμετωπίζονται τα προβλήματα από την πολυδιαδρομική διάδοση (multipath propagation). Με τις κεραίες αυτής της τεχνολογίας, το προαναφερθέν φαινόμενο εκμεταλλεύεται κατάλληλα, δημιουργούνται παράλληλοι δρόμοι διάδοσης και έτσι αυξάνεται ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης. Το τελευταίο γίνεται εφικτό όταν χρησιμοποιούνται ευφυής κεραίες τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη (Multiple Input Multiple Output MIMO συστήματα).

Το ενδιαφέρον στοιχείο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής έγκειται στα διαφαινόμενα από πλήθος εξομοιώσεων, πλεονεκτήματα που προκύπτουν με τη χρησιμοποίηση ευφών κεραιοσυστημάτων σε ασύρματα δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Η

αξιοποίηση της εν λόγω τεχνολογίας, είναι δυνατόν να βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα και απόδοση των ασύρματων κυψελωτών δικτύων στενού εύρους αλλά και ευρυζωνικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται γενικά στοιχεία σχετικά με την ανάπτυξη των νέων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων σε παγκόσμια κλίμακα. Επίσης γίνεται μια εισαγωγή στα ευφυή κεραιοσυστήματα και περιγράφονται τα είδη των κεραιών. Πιο συγκεκριμένα γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στις στοιχειοκεραίες ενεργών και παρασιτικών στοιχείων με ηλεκτρονικά ελεγχόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας. Παρατίθεται η θεωρητική ανάλυση καθώς και το σύνολο των μεταβλητών και παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο υπόλοιπο της μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται αναλυτικά τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρησιμοποίηση των ευφών κεραιών σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Επίσης αναφέρονται τα αποτελέσματα από πιλοτικές εφαρμογές που έχουν πραγματοποιηθεί σε ενεργά δίκτυα τηλεφωνίας.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται ένα κεραιοσύστημα αποτελούμενο από δύο ομοιοκατευθυντικές κεραιές και ένα προσαρμοζόμενο φίλτρο, κύρια λειτουργία του οποίου είναι η αντιμετώπιση ισχυρών σημάτων παρεμβολής. Τα πλεονεκτήματα και η απόδοση του συστήματος σε συνάρτηση με το μήκος της ακολουθίας εκπαίδευσης (training sequence) που χρησιμοποιείται, παρουσιάζονται μέσω αριθμητικών αποτελεσμάτων. Το σύστημα προσομοιώθηκε με το λογισμικό MATLAB, από όπου και προέκυψαν τα αριθμητικά αποτελέσματα.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται μέθοδοι εκτίμησης γωνιών άφιξης σημάτων (Direction-of-Arrival DoA). Αρχικά αναφέρεται και αναλύεται ο αλγόριθμος εκτίμησης γωνιών άφιξης MUSIC. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται δύο μέθοδοι εκτίμησης γωνιών άφιξης που έχουν αναπτυχθεί για κεραιές επιλογής δέσμης με ενεργά και παρασιτικά στοιχεία. Η πρώτη μέθοδος ουσιαστικά αποτελεί μια τροποποιημένη μορφή του αλγόριθμου MUSIC ενώ η δεύτερη μέθοδος έχει αναπτυχθεί για μοντέλο δύο διαδρομών και ευρυζωνικό περιβάλλον διάδοσης, ενώ χρησιμοποιεί και γενετικό αλγόριθμο. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για τις δύο μεθόδους.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται, πάλι μέσω αριθμητικών αποτελεσμάτων, τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρησιμοποίηση κεραιάς επιλογή δέσμης με παρασιτικά και ενεργά στοιχεία, σε ασύρματο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο στενού εύρους. Η συγκεκριμένη κεραιά έχει σχεδιαστεί με τη μέθοδο γενετικού αλγόριθμου

και καλύπτει όλο το αζιμουθιακό επίπεδο με έξι διαφορετικά διαγράμματα ακτινοβολίας. Χρησιμοποιήθηκε πάλι το λογισμικό πακέτο MATLAB με τη βοήθεια του οποίου προσομοιώθηκε και αξιολογήθηκε η βελτίωση που προκύπτει στην ποιότητα του ασύρματου δικτύου. Το κριτήριο αξιολόγησης ήταν ο ρυθμός λαθών (Bit-Error-Ratio BER) στην ανερχόμενη ζεύξη και ο λόγος επιθυμητού σήματος προς παρεμβολές (Carrier-Interference Ratio CIR) τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη.

Στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρησιμοποίηση κεραίας επιλογή δέσμης με παρασιτικά και ενεργά στοιχεία, σε ασύρματο ευρυζωνικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Για μια ακόμη φορά η κεραία σχεδιάστηκε με τη μέθοδο γενετικών αλγόριθμων. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια αναλυτική περιγραφή των δικτύων ασύρματης πρόσβασης και αξιολογείται η βελτίωση της κάλυψης που μπορεί να επιτευχθεί με το προτεινόμενο κεραιοσύστημα για τρεις διαφορετικούς τύπους σταθμών βάσης.

Τέλος στον Επίλογο γίνεται μια σύντομη αναδρομή στα αποτελέσματα της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής και εντοπίζονται τα σημεία στα οποία αναδείχθηκαν νέα στοιχεία για τον κλάδο των τηλεπικοινωνιών.

Βάσει όλων όσων αναφέρθηκαν παραπάνω, υπάρχει η ελπίδα ότι η παρούσα διατριβή συνιστά έστω και ένα μικρό εξελικτικό βήμα στον τομέα των ευφών κεραιών, όσον αφορά κυρίως τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την εφαρμογή τους σε ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.

Η εκπόνηση της διατριβής πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. Η εκπόνηση διήρκεσε έξι χρόνια, αρχής γενομένης από τον Φεβρουάριο του 2002. Τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν υλοποιήθηκαν κυρίως στο πακέτο λογισμικού MATLAB, ενώ αρκετές προσομοιώσεις κεραιών και εσωτερικών χώρων έγιναν με τη χρήση του προγράμματος SuperNEC (SNEC). Επίσης μελέτες ραδιοκάλυψης για συστήματα σημείου προς πολλαπλά σημεία πραγματοποιήθηκαν με το εργαλείο iQlink της εταιρείας Commsearch.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Χρήστο Καψάλη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε τόσο σε επιστημονικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον κ. Χρήστο Τσόκα, ηλεκτρονικό και τεχνικό

υπεύθυνο του Εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων, για την άριστη συνεργασία και επικοινωνία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής. Ευχαριστώ ακόμη τους συναδέλφους μου στο Εργαστήριο Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων, για την ανθρώπινη επικοινωνία και συνεργασία μας. Ειδικότερα αξίζει αναφορά στους Π. Βαρλάμο, Β. Τσιαφάκη, Ε. Νάνου, Ι. Χαιρετάκη, Σ. Μυτιληναίο, Σ. Παναγιώτου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστώ θερμά τον Διδάκτορα κ. Παναγιώτη Τρακάδα για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της διατριβής. Τέλος θα ήθελα να εκφράσω τη βαθιά ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου και προς όλους όσους μου συμπαραστάθηκαν για να φέρω εις πέρας την παρούσα διατριβή.

Απόστολος Ι. Σωτηρίου  
Αθήνα, Οκτώβριος 2008







## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	9
<b>ABSTRACT</b> .....	11
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	13
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	19
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b> .....	23
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	29
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΥΦΥΕΙΣ ΚΕΡΑΙΕΣ</b> .....	
1.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	33
1.2 ΕΙΔΗ ΕΥΦΥΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ .....	35
1.3 ΕΥΦΥΕΙΣ ΕΠΙΠΕΔΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ ΜΕ ΕΝΕΡΓΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	38
1.3.1 Διάγραμμα ακτινοβολίας επίπεδης στοιχειοκεραίας .....	40
1.3.2 Υπολογισμός ίδιας και αμοιβαίας αντίστασης κεραίας .....	42
1.3.3 Υπολογισμός ίδιας και αμοιβαίας αντίστασης στοιχειοκεραίας με τη μέθοδο της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Induced EMF Method) .....	46
1.3.4 Αμοιβαία αντίσταση μεταξύ ενεργών και παρασιτικών στοιχείων.....	48
1.3.5 Μέθοδος των ροπών (ολοκληρωτικές εξισώσεις) .....	50
1.3.6 Διαμόρφωση δέσμης με ενεργά και παρασιτικά στοιχεία .....	53
1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	54
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΙΛΟΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ</b> .....	
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ - ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ .....	57
2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΕΥΦΥΩΝ ΚΕΡΑΙΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	59
2.2.1 Αύξηση χωρητικότητας τηλεπικοινωνιακού συστήματος .....	60
2.2.2 Αύξηση κάλυψης σταθμού βάσης .....	64
2.2.3 Αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων .....	65
2.2.4 Αύξηση ασφάλειας .....	66

2.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΥΦΥΩΝ ΚΕΡΑΙΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ .....	67
2.3.1 Αποτελέσματα πιλοτικής εφαρμογής του συστήματος της Metawave® Communications ..	67
2.3.1.1 Αποτελέσματα από το δίκτυο στην πόλη της Σαγκάης.....	67
2.3.1.2 Αποτελέσματα από το δίκτυο στην πόλη της Guangdong .....	69
2.3.1.3 Αποτελέσματα από το δίκτυο στην πόλη της Guangzhou .....	70
2.3.2 Αποτελέσματα από μελέτες και εφαρμογές της εταιρείας Symena .....	72
2.3.3 Αποτελέσματα από συστήματα της Ericsson στα δίκτυα Mannesmann και D2 GSM .....	73
2.3.4 Εφαρμογή συστήματος ArrayComm (Intellicell) στο δίκτυο AirNet Communications Corp (Broadband Super Capacity AdaptaCell GSM BTS).....	76
2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	78

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΟΛΗΣ ΣΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ –**

#### **ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΕΣΜΗΣ ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΖΟΜΕΝΑ ΦΙΛΤΡΑ.....**

3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	83
3.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....	85
3.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	90
3.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	94

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΓΩΝΙΑΣ ΑΦΙΞΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ.....**

4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	99
4.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΓΩΝΙΩΝ ΑΦΙΞΗΣ ΜΕ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ MUSIC .....	101
4.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΓΩΝΙΩΝ ΑΦΙΞΗΣ ΜΕ ΚΕΡΑΙΟΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	107
4.3.1 Μέθοδος εκτίμησης γωνιών άφιξης με κεραιοσύστημα επιλογής δέσμης στοιχείων βασισμένη στον αλγόριθμο MUSIC .....	108
4.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τη μέθοδο εκτίμησης γωνιών άφιξης με κεραιοσύστημα επιλογής δέσμης στοιχείων βασισμένη στον αλγόριθμο MUSIC .....	111
4.3.3 Μέθοδος εκτίμησης γωνιών άφιξης για δύο διαδρομών μοντέλο, ευρυζωνικό περιβάλλον διάδοσης και κεραιοσύστημα ενεργών – παρασιτικών στοιχείων .....	117
4.3.4 Αποτελέσματα μεθόδου εκτίμησης γωνιών άφιξης για δύο διαδρομών μοντέλο, ευρυζωνικό περιβάλλον διάδοσης και κεραιοσύστημα ενεργών – παρασιτικών στοιχείων.....	120

4.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	122
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΕΠΙΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΜΕ ΕΝΕΡΓΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΕ ΚΥΨΕΛΩΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ .....</b>	
5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	127
5.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΜΕ 7 ΕΝΕΡΓΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	127
5.2.1 Στοιχεία σχεδιασμού .....	127
5.2.2 Μοντέλο προσομοίωσης επίδοσης κεραιοσυστήματος 7 διπόλων – κριτήριο ο ρυθμός λαθών BER .....	136
5.2.3 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης .....	137
5.2.4 Μοντέλο προσομοίωσης επίδοσης κεραιοσυστήματος 7 διπόλων – κριτήριο ο λόγος επιθυμητού σήματος προς παρεμβολές CIR .....	144
5.2.5 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης-ανερχόμενη ζεύξη .....	147
5.2.6 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης-κατερχόμενη ζεύξη .....	152
5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	159
5.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	160
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΕΠΙΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΜΕ ΕΝΕΡΓΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΕ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΣΗΜΕΙΟΥ ΠΡΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΣΗΜΕΙΑ .....</b>	
6.1 ΔΙΚΤΥΑ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ .....	165
6.2 ΤΟΠΙΚΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ .....	166
6.2.1 IEEE 802.11b .....	167
6.2.1.1 Περιγραφή – Γενικές αρχές .....	168
6.2.1.2 Ασφάλεια δεδομένων .....	169
6.2.1.3 Ταχύτητα μετάδοσης .....	173
6.2.1.4 Κάλυψη .....	173
6.2.2 Bluetooth .....	173
6.2.3 IEEE 802.11a - HiperLAN 2 .....	175
6.2.4 HomeRF .....	176
6.3 ΔΙΚΤΥΑ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ .....	176
6.3.1 Δίκτυα WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access .....	176

6.3.2 Δίκτυα LMDS - Local Multipoint Distribution System.....	178
6.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΜΕ 6 ΕΝΕΡΓΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ LMDS .....	181
6.4.1 Στοιχεία σχεδιασμού.....	181
6.4.2 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης.....	184
6.4.2.1 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης για το σενάριο κτηρίου σε αστικό κέντρο ...	192
6.4.2.2 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης για το σενάριο σταθμού σε ύψωμα.....	195
6.4.2.3 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης για το σενάριο σταθμού που καλύπτει κεντρικό δρόμο .....	197
6.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	200
6.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	201
<b>ΕΠΙΛΟΓΟΣ</b> .....	
ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΣΗΜΕΙΑ ΠΟΥ ΠΡΟΑΓΕΤΑΙ Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ.....	206
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΕΚΤΑΝΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	214

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Πλήθος χρηστών GSM σε παγκόσμια κλίμακα .....	33
Σχήμα 1.2 Εμπορικά δίκτυα WCDMA.....	33
Σχήμα 1.3 WCDMA χρήστες .....	34
Σχήμα 1.4 Πενταετής πρόβλεψη για WCDMA χρήστες .....	35
Σχήμα 1.5 Ευφυή κεραιοσυστήματα .....	36
Σχήμα 1.6 Κεραίες επιλογής λοβού.....	37
Σχήμα 1.7 Κεραίες στρεφόμενου λοβού με έλεγχο φάσης.....	37
Σχήμα 1.8 Προσαρμοστικές κεραίες .....	37
Σχήμα 1.9 Επίπεδη κεραία τεσσάρων διπολικών στοιχείων.....	39
Σχήμα 1.10 Γεωμετρία επίπεδης στοιχειοκεραίας.....	40
Σχήμα 1.11α Κεραία σε κατάσταση λήψης.....	44
Σχήμα 1.11β Κεραία σε κατάσταση λήψης-Ισοδύναμο Thevenin.....	44
Σχήμα 1.11γ Κεραία σε κατάσταση λήψης-Ισοδύναμο Norton .....	45
Σχήμα 1.12α Κεραία σε κατάσταση εκπομπής.....	45
Σχήμα 1.12β Κεραία σε κατάσταση εκπομπής-Ισοδύναμο Thevenin .....	45
Σχήμα 1.12γ Κεραία σε κατάσταση εκπομπής-Ισοδύναμο Norton .....	46
Σχήμα 1.13 Ισοδύναμο Thevenin κύκλωμα.....	49
Σχήμα 1.14 Στοιχειοκεραία ενεργών-παρασιτικών στοιχείων.....	53
Σχήμα 2.1 Περιορισμοί στην απόδοση των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων .....	57
Σχήμα 2.2 Δομή κυψελωτού συστήματος .....	59
Σχήμα 2.3 Τεχνική Cell Splitting .....	61
Σχήμα 2.4 Τυπική δομή σταθμών με 3 sectors.....	62
Σχήμα 2.5 Σύστημα επιλογής δέσμης.....	63
Σχήμα 2.6 Σύστημα Metawave Spotlight 2200 .....	71
Σχήμα 2.7 Αρχιτεκτονική ευφυούς κεραιοσυστήματος Ericsson .....	74

Σχήμα 2.8 Ραδιοκαμπίνα και κεραιοσύστημα Ericsson που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων .....	75
Σχήμα 2.9 Διαγράμματα ακτινοβολίας του συστήματος της Ericsson .....	75
Σχήμα 2.10 AirNet Super Capacity AdaptaCell GSM BTS & ArrayCom IntelliCell .....	77
Σχήμα 3.1 Σύστημα καταστολής σήματος παρεμβολής .....	86
Σχήμα 3.2 Κανονικοποιημένο διάγραμμα λήψης με γωνία άφιξης παρεμβολέα ίση με 30° .....	91
Σχήμα 3.3 Κανονικοποιημένο διάγραμμα λήψης με γωνία άφιξης παρεμβολέα ίση με 240° .....	91
Σχήμα 3.4 Κανονικοποιημένο διάγραμμα λήψης με γωνία άφιξης παρεμβολέα ίση με 330° .....	92
Σχήμα 3.5 Κανονικοποιημένο διάγραμμα λήψης με γωνία άφιξης παρεμβολέα ίση με 60° .....	92
Σχήμα 3.6 Κανονικοποιημένο επίπεδο λήψης στις 30° σε σχέση με μήκος ακολουθίας εκπαίδευσης και λόγο ισχύος παρεμβολικού προς επιθυμητό σήμα.....	94
Σχήμα 4.1 Διαγράμματα κεραίας Switched Parasitic Planar Array 7 στοιχείων .....	113
Σχήμα 4.2 Διαγράμματα κεραίας Switched Parasitic Circular Array 6 στοιχείων .....	114
Σχήμα 4.3 Δυνατότητα ανάλυσης της μεθόδου θεωρώντας κεραία Switched Parasitic Planar Array 7 στοιχείων και κεραία Switched Parasitic Circular Array 6 στοιχείων .....	114
Σχήμα 4.4 Αποτελέσματα για κεραιοσύστημα SPCA 4 και 8 στοιχείων .....	115
Σχήμα 4.5 Συγκριτικά αποτελέσματα για κεραιοσύστημα SPCA 4, 6 και 8 στοιχείων .....	115
Σχήμα 4.6 Σχέση $\sigma_{ang}$ ως προς $N_S$ για SPCA 4,6 και 8 στοιχείων και διάφορα $\Delta\phi$ .....	116
Σχήμα 5.1α Χωροθέτηση των 7 στοιχείων .....	129
Σχήμα 5.1β Χωροθέτηση των 7 στοιχείων .....	129
Σχήμα 5.2 Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο για την κωδικολέξη ‘0110010’ .....	130
Σχήμα 5.3 Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο για την κωδικολέξη ‘0000011’ .....	131
Σχήμα 5.4 Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο για την κωδικολέξη ‘0000001’ .....	132
Σχήμα 5.5 Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο για την κωδικολέξη ‘0101100’ .....	133
Σχήμα 5.6 Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο για την κωδικολέξη ‘1100000’ .....	134



Σχήμα 5.7 Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο για την κωδικολέξη ‘1010000’ .....	135
Σχήμα 5.8 Μοντέλο προσομοίωσης .....	136
Σχήμα 5.9α Επίδοση κεραιοσυστήματος σε περιβάλλον προσθετικού Gaussian θορύβου (AWGN)- ρυθμός μετάδοσης δεδομένων 256 kbps .....	138
Σχήμα 5.9β Επίδοση κεραιοσυστήματος σε περιβάλλον προσθετικού Gaussian θορύβου (AWGN)- ρυθμός μετάδοσης δεδομένων 512 kbps .....	139
Σχήμα 5.9γ Επίδοση κεραιοσυστήματος σε περιβάλλον προσθετικού Gaussian θορύβου (AWGN)- ρυθμός μετάδοσης δεδομένων 1024 kbps .....	139
Σχήμα 5.9δ Επίδοση κεραιοσυστήματος σε περιβάλλον προσθετικού Gaussian θορύβου (AWGN)- ρυθμός μετάδοσης δεδομένων 2048 kbps .....	140
Σχήμα 5.10α Επίδοση κεραιοσυστήματος σε περιβάλλον Rayleigh μιας διαδρομής και προσθετικού Gaussian θορύβου (AWGN) – ρυθμός μετάδοσης 256 kbps .....	141
Σχήμα 5.10β Επίδοση κεραιοσυστήματος σε περιβάλλον Rayleigh μιας διαδρομής και προσθετικού Gaussian θορύβου (AWGN) – ρυθμός μετάδοσης 512 kbps .....	142
Σχήμα 5.10γ Επίδοση κεραιοσυστήματος σε περιβάλλον Rayleigh μιας διαδρομής και προσθετικού Gaussian θορύβου (AWGN) – ρυθμός μετάδοσης 1024 kbps .....	142
Σχήμα 5.10δ Επίδοση κεραιοσυστήματος σε περιβάλλον Rayleigh μιας διαδρομής και προσθετικού Gaussian θορύβου (AWGN) – ρυθμός μετάδοσης 2048 kbps .....	143
Σχήμα 5.11 Διάγραμμα αστερισμού δεδομένων λήψης .....	144
Σχήμα 5.12 Δίκτυο με cluster size=3 .....	146
Σχήμα 5.13 Δίκτυο με cluster size=7 .....	146
Σχήμα 5.14 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης-περίπτωση pico cell.....	148
Σχήμα 5.15 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης-περίπτωση micro cell .....	148
Σχήμα 5.16 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης-περίπτωση midi cell .....	149
Σχήμα 5.17 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης-περίπτωση macro cell .....	149
Σχήμα 5.18 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης και κινητό χρήστη -περίπτωση pico cell .....	150
Σχήμα 5.19 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης και κινητό χρήστη -περίπτωση micro cell.....	150

Σχήμα 5.20 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης και κινητό χρήστη -περίπτωση midi cell.....	151
Σχήμα 5.21 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης και κινητό χρήστη -περίπτωση macro cell .....	151
Σχήμα 5.22 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα μόνο στο σταθμό βάσης -περίπτωση macro cell....	153
Σχήμα 5.23 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα μόνο στο σταθμό βάσης -περίπτωση pico cell.....	153
Σχήμα 5.24 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα μόνο στο σταθμό βάσης -περίπτωση micro cell ....	154
Σχήμα 5.25 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα μόνο στο σταθμό βάσης -περίπτωση midi cell .....	154
Σχήμα 5.26 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα μόνο στον τερματικό σταθμό -περίπτωση macro cell .....	155
Σχήμα 5.27 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα μόνο στον τερματικό σταθμό -περίπτωση pico cell .....	155
Σχήμα 5.28 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα μόνο στον τερματικό σταθμό -περίπτωση micro cell .....	156
Σχήμα 5.29 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα μόνο στον τερματικό σταθμό -περίπτωση midi cell .....	156
Σχήμα 5.30 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στον τερματικό σταθμό και στο σταθμό βάσης - περίπτωση macro cell .....	157
Σχήμα 5.31 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στον τερματικό σταθμό και στο σταθμό βάσης - περίπτωση pico cell .....	157
Σχήμα 5.32 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στον τερματικό σταθμό και στο σταθμό βάσης - περίπτωση micro cell.....	158
Σχήμα 5.33 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στον τερματικό σταθμό και στο σταθμό βάσης - περίπτωση midi cell.....	158
Σχήμα 6.1. Δομή κρυπτογραφημένου πλαισίου WEP.....	171
Σχήμα 6.2. Χωροθέτηση των 6 στοιχείων και σχετικές φάσεις τροφοδότησης .....	182
Σχήμα 6.3. Θεωρητικό διάγραμμα ακτινοβολίας υποκυψέλης 1 .....	185
Σχήμα 6.4. Θεωρητικό διάγραμμα ακτινοβολίας υποκυψέλης 2.....	186
Σχήμα 6.5. Θεωρητικό διάγραμμα ακτινοβολίας υποκυψέλης 3 .....	187

Σχήμα 6.6. Θεωρητικό διάγραμμα ακτινοβολίας κυψέλης σηματοδοσίας .....	188
Σχήμα 6.7. Διάγραμμα ακτινοβολίας υποκυψέλης 1 .....	189
Σχήμα 6.8. Διάγραμμα ακτινοβολίας υποκυψέλης 2 .....	189
Σχήμα 6.9. Διάγραμμα ακτινοβολίας υποκυψέλης 3 .....	190
Σχήμα 6.10. Διάγραμμα ακτινοβολίας κυψέλης σηματοδοσίας .....	190
Σχήμα 6.11. Διαγράμματα ακτινοβολίας (συγκριτικά).....	191
Σχήμα 6.12α. Αποτελέσματα για ΣΒ σε ψηλό κτήριο για sector με κατεύθυνση 43° .....	193
Σχήμα 6.12β. Αποτελέσματα για ΣΒ σε ψηλό κτήριο για sector με κατεύθυνση 133° .....	193
Σχήμα 6.12γ. Αποτελέσματα για ΣΒ σε ψηλό κτήριο για sector με κατεύθυνση 223° .....	194
Σχήμα 6.12δ. Αποτελέσματα για ΣΒ σε ψηλό κτήριο για sector με κατεύθυνση 313° .....	194
Σχήμα 6.13. Συνολικά αποτελέσματα για ΣΒ σε ψηλό κτήριο.....	195
Σχήμα 6.14α. Αποτελέσματα για ΣΒ σε ύψωμα με κατεύθυνση 86° .....	196
Σχήμα 6.14β. Αποτελέσματα για ΣΒ σε ύψωμα με κατεύθυνση 176° .....	196
Σχήμα 6.15. Συνολικά αποτελέσματα για ΣΒ σε ύψωμα.....	197
Σχήμα 6.16α. Αποτελέσματα για ΣΒ που καλύπτει κεντρικό δρόμο με κατεύθυνση 38° .....	198
Σχήμα 6.16β. Αποτελέσματα για ΣΒ που καλύπτει κεντρικό δρόμο με κατεύθυνση 218° .....	198
Σχήμα 6.17. Συνολικά αποτελέσματα για ΣΒ που καλύπτει κεντρικό δρόμο .....	199
Σχήμα 6.18. Συνολικά αποτελέσματα για τα τρία σενάρια .....	200



## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1. Αποτελέσματα για κεραιοσύστημα SPPA 7 στοιχείων και SPCA 6 στοιχείων, 6 διαγραμμάτων και γωνίες κύριων σημάτων στην ίδια δέσμη.....	120
Πίνακας 4.2. Αποτελέσματα για κεραιοσύστημα 7 στοιχείων, 6 διαγραμμάτων και γωνίες κύριων σημάτων σε διαφορετικές δέσμες.....	121
Πίνακας 4.3. Αποτελέσματα για κεραιοσύστημα SPCA 6 στοιχείων και διαφορετικό πλήθος διαγραμμάτων ακτινοβολίας .....	122
Πίνακας 5.1. Ψηφιακές κωδικολέξεις, διευθύνσεις μέγιστου κέρδους, εύρος 3 dB και σχετικό επίπεδο πρώτου δευτερεύοντος λοβού.....	128
Πίνακας 5.2. Θέσεις και φάσεις τάσης των στοιχείων .....	128
Πίνακας 5.3. Πίνακας εμπέδησης.....	128
Πίνακας 5.4. Ύψος σταθμών βάσης για τις προσομοιώσεις.....	145
Πίνακας 6.1. Συνοπτικά χαρακτηριστικά δικτύων ασύρματης πρόσβασης.....	180
Πίνακας 6.2. Συντεταγμένες στοιχείων .....	184









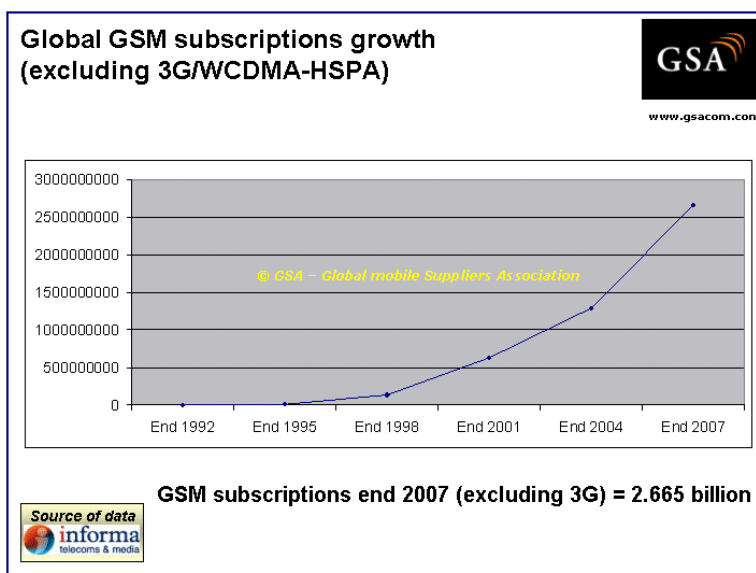
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΥΦΥΕΙΣ ΚΕΡΑΙΕΣ

### 1.1 Γενικά στοιχεία

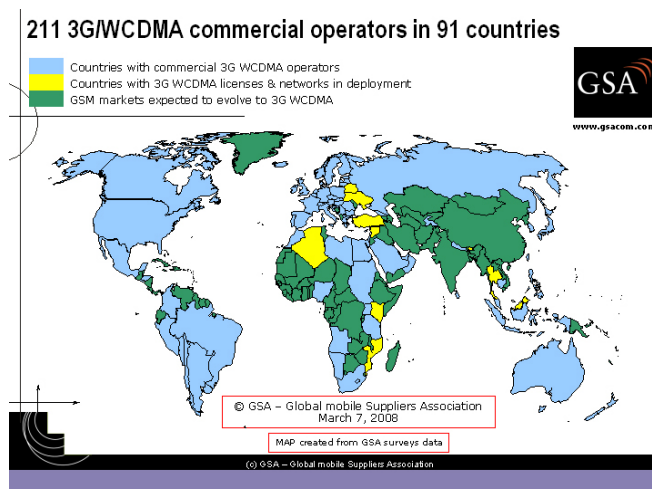
Η τεχνολογία των ευφών ή αλλιώς προσαρμοζόμενων κεραιών στις κινητές και σταθερές ασύρματες τηλεπικοινωνίες, αναπτύσσεται ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες. Έχει παρατηρηθεί ότι ο όγκος δεδομένων που διακινείται από τα ασύρματα δίκτυα τηλεπικοινωνιών, αυξάνεται συνεχώς με ταχύ ρυθμό. Το πλήθος των χρηστών και οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων των νέων υπηρεσιών, συμβάλλουν στην παραπάνω

διαπίστωση. Στα συστήματα δεύτερης γενιάς (2G) έχει ήδη παρατηρηθεί η αυξητική τάση και αντιμετωπίζεται. Οι χρήστες του GSM το πρώτο τρίμηνο του 2008 άγγιξαν τα 3 δισεκατομμύρια



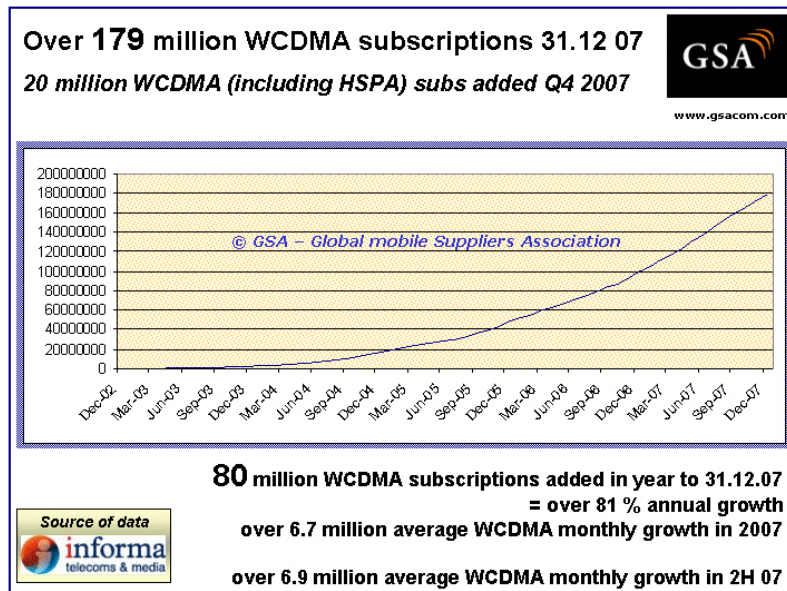
Σχήμα 1.1 Πλήθος χρηστών GSM σε παγκόσμια κλίμακα [2]

σε παγκόσμια κλίμακα [1] ένα όριο που μέχρι το τέλος του τρέχοντος έτους θα έχει ξεπεραστεί κατά πολύ. Η αυξητική τάση των χρηστών επιβεβαιώνεται και από το διπλανό σχήμα 1.1 [2]. Είναι σίγουρο ότι ανάλογο φαινόμενο θα εμφανιστεί και στα συστήματα τρίτης



Σχήμα 1.2 Εμπορικά δίκτυα WCDMA [2]

γενιάς (3G), δεδομένου ότι η ανάπτυξή τους είναι πολύ δυναμική. Μέχρι τον Μάρτιο του 2008, σε εμπορική λειτουργία έχουν τεθεί 211 3G/WCDMA δίκτυα, με συνολικά 179 εκατομμύρια χρήστες όπως φαίνεται από τα σχήματα 1.2 και 1.3. Η



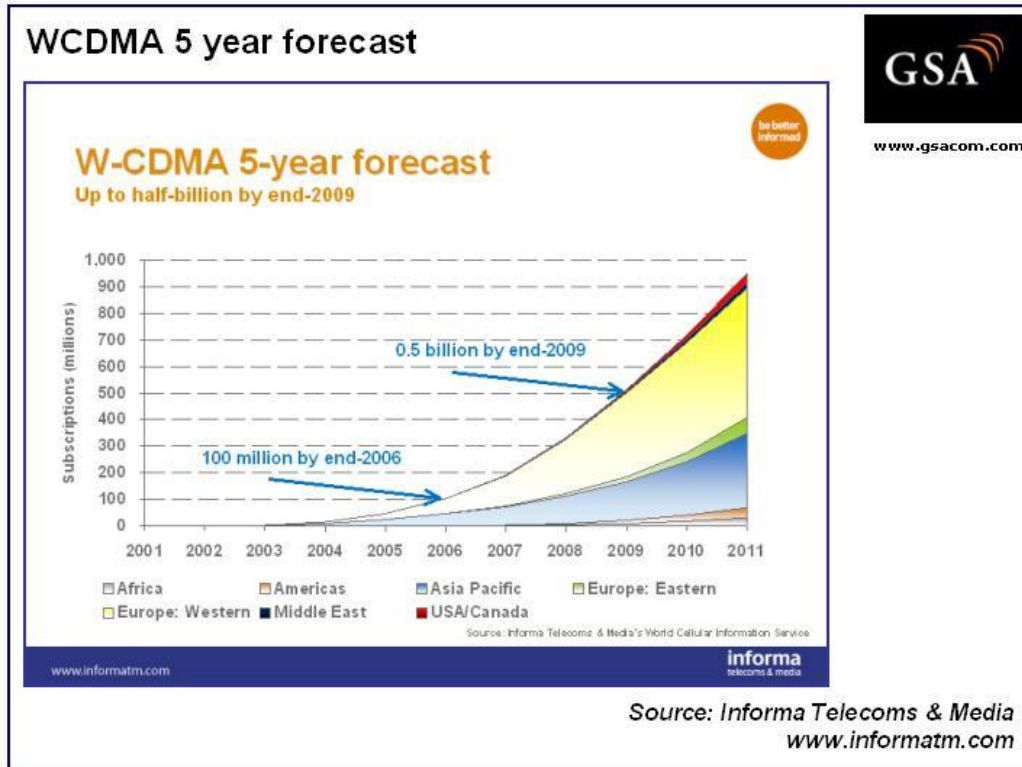
Σχήμα 1.3 WCDMA χρήστες [2]

ασύρματης τηλεπικοινωνίας και αναζητούνται οι κατάλληλες λύσεις. Στο σχήμα 1.4 φαίνεται η πενταετής πρόβλεψη για τους WCDMA χρήστες. Η φιλοσοφία των ασυρμάτων δικτύων μέχρι πριν από λίγα χρόνια είχε στο στόχαστρο τις υπηρεσίες φωνής και γραπτών μηνυμάτων (SMS). Η υφιστάμενη κατάσταση των δικτύων και οι παραδοσιακές μέθοδοι δεν τους επιτρέπουν να ανταπεξέλθουν στο φόρτο υπηρεσιών υψηλού ρυθμού μετάδοσης, στην κινητικότητα και φορητότητα όπου απαιτούν τα σύγχρονα κυψελωτά δίκτυα. Η αναζήτηση επιπλέον πόρων για την κάλυψη της απαιτούμενης χωρητικότητας στα δίκτυα, μπορεί να καλυφθεί με τη χρησιμοποίηση ευφυών κεραιοσυστημάτων [3-9].

Οι ευφυής κεραιές (smart antennas) είναι ουσιαστικά στοιχειοκεραιές, διατάξεις από όμοιους ακτινοβολητές, που λαμβάνουν και εκπέμπουν ταυτόχρονα. Ο όρος ευφυής αποδίδεται καθώς μέσα από μηχανισμούς επεξεργασίας των λαμβανόμενων σημάτων, γίνεται εντοπισμός των χρηστών ενδιαφέροντος και τροποποιείται το διάγραμμα ακτινοβολίας ώστε να μεγιστοποιείται το κέρδος προς αυτούς και να ελαχιστοποιείται προς όλους τους υπόλοιπους χρήστες, οι οποίοι αντιμετωπίζονται ως παρεμβολείς. Η στροφή του διαγράμματος ακτινοβολίας μπορεί να επιτευχθεί με ψηφιακή επεξεργασία σήματος, με κατάλληλους RF διακόπτες και παθητικά στοιχεία όπως στροφείς φάσης.

διαφαινόμενη  
 αύξηση της  
 κίνησης κυρίως  
 των δεδομένων,  
 έχει θέσει  
 σοβαρούς  
 προβληματισμούς  
 τόσο σε  
 κατασκευαστές  
 όσο και σε  
 παρόχους  
 υπηρεσιών  
 κινητής

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα γίνει μια γενική περιγραφή των ευφυών κεραιοσυστημάτων και θα περιγραφούν όλα τα είδη των κεραιών. Επίσης θα αναλυθεί το μοντέλο λειτουργίας τους ώστε να γίνει κατανοητή η διαδικασία τροποποίησης του διαγράμματος ακτινοβολίας.

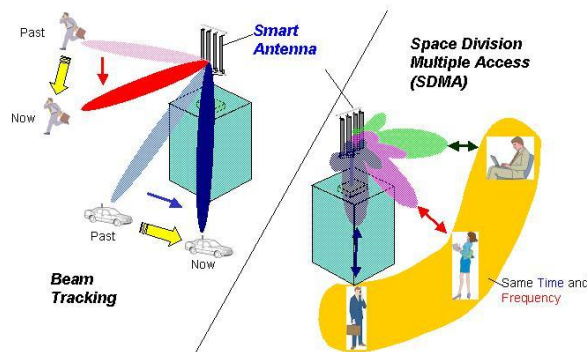
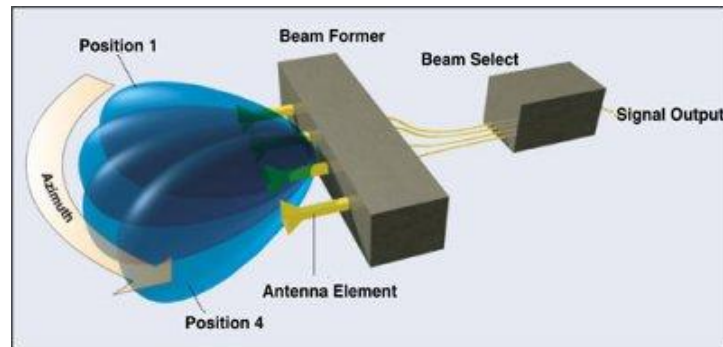


Σχήμα 1.4 Πενταετής πρόβλεψη για WCDMA χρήστες [2]

## 1.2 Είδη ευφυών κεραιών

Με τον όρο κεραία, ουσιαστικά εκφράζεται το κομμάτι εκείνο του κεραιοσυστήματος που μετατρέπει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε ηλεκτρικά σήματα που μεταδίδονται μέσα από ομοαξονικά καλώδια. Στις ευφυής κεραιές, ο όρος "κεραία" έχει μια πιο διευρυμένη έννοια από αυτή που αναφέρθηκε παραπάνω. Το κεραιοσύστημα αποτελείται από ένα σύνολο ακτινοβολούντων στοιχείων, ένα σύστημα διανομής των ηλεκτρικών σημάτων και μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας των ηλεκτρικών σημάτων. Η μονάδα επεξεργασίας είναι το στοιχείο στο οποίο αποδίδεται ο βαθμός ευφυΐας της κεραιάς και συχνά υλοποιείται με ένα μικροεπεξεργαστή (Digital Signal Processor DSP). Ο τελευταίος ελέγχει τις παραμέτρους τροφοδότησης των στοιχείων μεταβάλλοντας το διάγραμμα

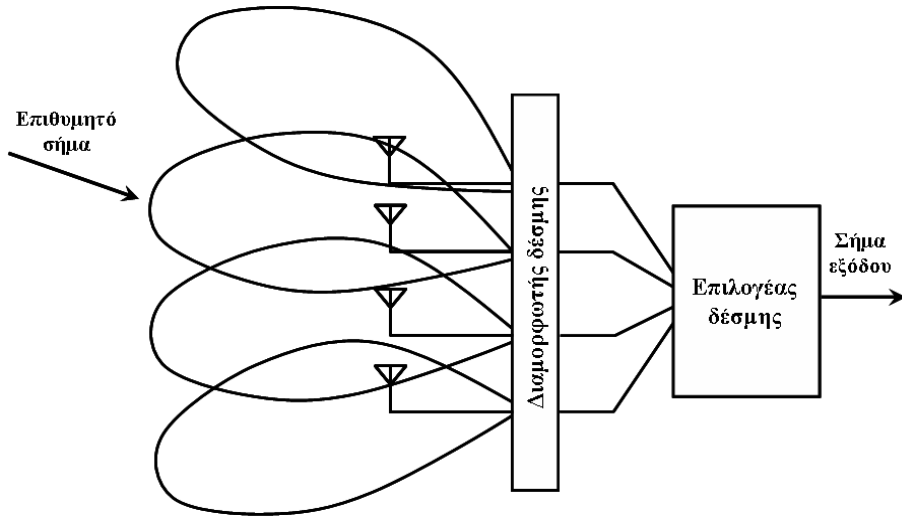
ακτινοβολίας του συστήματος με σκοπό τη βελτιστοποίηση της επικοινωνίας μεταξύ πομπού και δέκτη (σχήμα 1.5).



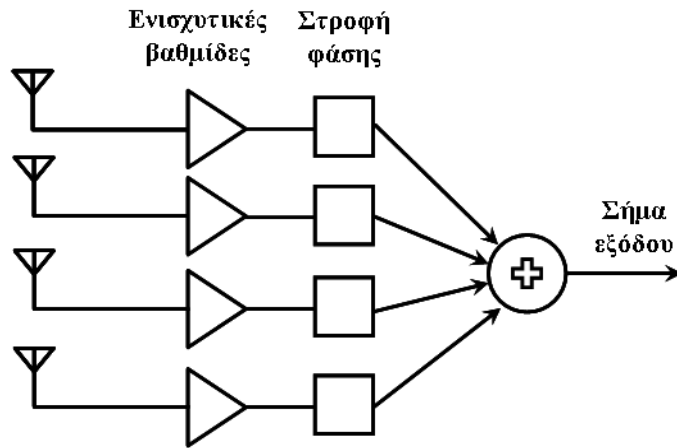
**Smart Antenna Technology**

Σχήμα 1.5 Ευφυή κεραιοσυστήματα

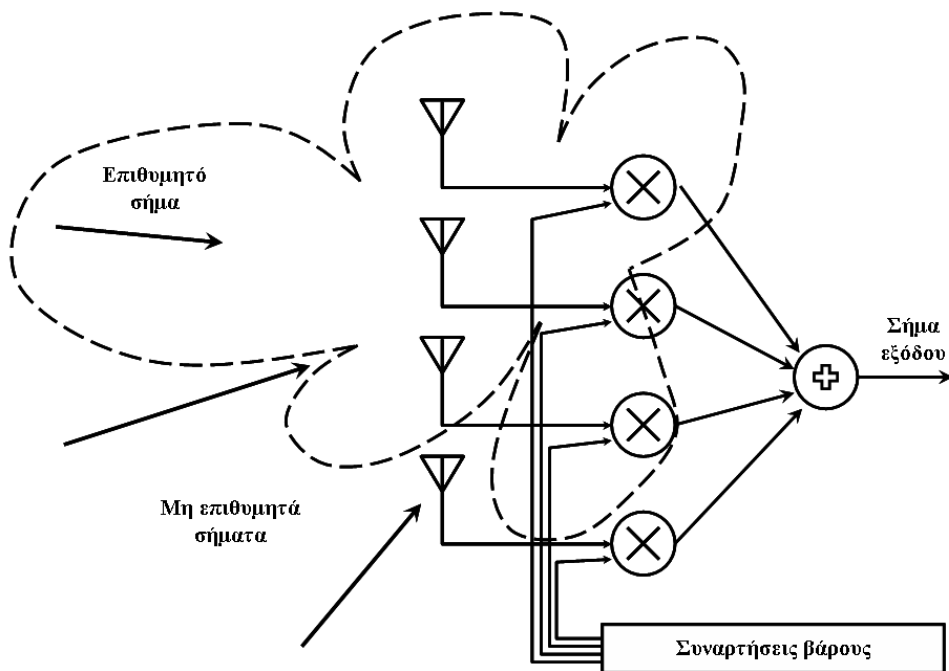
Ανάλογα με τον τρόπο υλοποίησης της ευφυούς κεραιάς και το επίπεδο ευφυΐας, μπορεί να γίνει ένας διαχωρισμός σε τρεις βασικές κατηγορίες: κεραιές επιλογής λοβού ή επιλογή δέσμης (Switched Lobe SL – Switched Beam SB), κεραιές στρεφόμενου λοβού με έλεγχο φάσης (Phased Arrays PA) και προσαρμοστικές κεραιές (Adaptive Arrays AA) [10-13]. Τα σχήματα 1.6-1.8 παρουσιάζουν τα τρία αυτά είδη των κεραιών.



Σχήμα 1.6 Κεραίες επιλογής λοβού



Σχήμα 1.7 Κεραίες στρεφόμενου λοβού με έλεγχο φάσης



Σχήμα 1.8 Προσαρμοστικές κεραίες

Οι κεραιές επιλογής λοβού αποτελούν το πιο απλό είδος κεραιών και η φιλοσοφία λειτουργίας τους περιορίζεται στην επιλογή ενός διαγράμματος ακτινοβολίας μεταξύ προκαθορισμένων διαγραμμάτων. Η επιλογή του ενεργού λοβού ελέγχεται από την τιμή της λαμβανόμενης ισχύος και επομένως επιλέγεται το διάγραμμα στο οποίο καταμετράται η μέγιστη ισχύς. Συγκρινόμενη με τις συμβατικές κεραιές, αυτή η κατηγορία των κεραιών παρουσιάζει μεγαλύτερη κατευθυντικότητα και επομένως αυξημένο κέρδος. Πλεονέκτημα αποτελεί η σχετικά εύκολη μετατροπή των υφιστάμενων κεραιοσυστημάτων των σταθμών βάσης σε κεραιές επιλογής λοβού.

Οι κεραιές στρεφόμενου λοβού με έλεγχο φάσης (Phased Arrays PA) αποτελούν το δεύτερο επίπεδο ευφυΐας των συστημάτων. Σε αυτό το σημείο εισάγεται η έννοια της γωνίας άφιξης (Direction-of-Arrival DoA) των λαμβανόμενων σημάτων ενδιαφέροντος. Από το σύνολο των σημάτων που λαμβάνονται και με κατάλληλους αλγόριθμους, είναι δυνατόν να εκτιμηθούν με μεγάλη ακρίβεια οι γωνίες άφιξής τους. Ο ενεργός λοβός και πάλι λαμβάνει τη μέγιστη ισχύ.

Στην τρίτη κατηγορία ανήκουν οι προσαρμοστικές κεραιές (Adaptive Arrays AA). Εκτός από τις γωνίες άφιξης των σημάτων ενδιαφέροντος, προσδιορίζονται και οι γωνίες άφιξης των σημάτων παρεμβολής. Το διάγραμμα ακτινοβολίας προσαρμόζεται ώστε εκτός από τη μεγιστοποίηση του κέρδους προς τον χρήστη ενδιαφέροντος να ελαχιστοποιείται το κέρδος προς τα σήματα παρεμβολής. Ταυτόχρονα, τα προσαρμοστικά συστήματα εκμεταλλεύονται το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών (multipath) και δημιουργούνται δευτερεύοντες λοβοί προς τις κατευθύνσεις αυτές, αυξάνοντας το συνολικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Συνέπεια όλων των παραπάνω χαρακτηριστικών λειτουργίας είναι η μεγιστοποίηση του λόγου σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (SINR).

### **1.3 Ευφυείς επίπεδες κεραιές με παρασιτικά και ενεργά στοιχεία**

Στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή αξιολογήθηκε η λειτουργία ασύρματων δικτύων τηλεπικοινωνίας όταν σε αυτά θεωρηθούν εγκατεστημένα κεραιοσυστημάτων επιλογής λοβού αποτελούμενο από ενεργά και παρασιτικά στοιχεία. Η συγκεκριμένη κατηγορία κεραιών αποτελεί αντικείμενο ευρείας έρευνας κυρίως λόγω της απλής αρχιτεκτονικής που ακολουθεί. Οι κεραιές αποτελούνται από

πανομοιότυπα διπολικά στοιχεία τα οποία είναι χωροθετημένα κατάλληλα. Στο σχήμα 1.9 παρουσιάζεται μια επίπεδη κεραία τεσσάρων διπολικών στοιχείων.

Η διαμόρφωση της δέσμης πραγματοποιείται με ψηφιακό τρόπο και τη βοήθεια RF διακοπών που συνδέονται στα διπολικά στοιχεία. Οι RF διακόπτες αποτελούν το κύκλωμα τροφοδοσίας των στοιχείων της κεραίας και ελέγχονται με ηλεκτρονικό τρόπο. Ανάλογα με την κατάσταση των διακοπών (on-off), τα στοιχεία της κεραίας τροφοδοτούνται με ρεύμα (ενεργά) ή όχι (παρασιτικά, βραχυκυκλωμένα). Τα παρασιτικά στοιχεία διαρρέονται από ρεύμα που επάγεται λόγω της τροφοδότησης των ενεργών στοιχείων [14]. Σε μια κεραία με  $N$  στοιχεία, υπάρχουν  $2^N$  συνολικά συνδυασμοί για την κατάσταση που μπορεί να βρεθούν οι RF διακόπτες. Η κατάσταση όλων των διακοπών αντιστοιχίζεται σε μια κωδικολέξη μήκους  $N$ , όπου με "0" χαρακτηρίζεται η κατάσταση "off" του διακόπτη (ανοιχτός) και με "1" χαρακτηρίζεται η κατάσταση "on" του διακόπτη (κλειστός). Η μοναδική κατάσταση των διακοπών που αποκλείεται είναι αυτή στην οποία όλοι οι διακόπτες είναι ανοιχτοί. Κάθε μια κωδικολέξη οδηγεί σε διαφορετικά ρεύματα για τα στοιχεία της στοιχειοκεραίας, άρα και σε διαφορετικό διάγραμμα ακτινοβολίας, ένα από τα  $2^N - 1$  συνολικά. Η ταχύτητα στροφής του διαγράμματος ακτινοβολίας εξαρτάται από τις δυνατότητες των RF διακοπών.

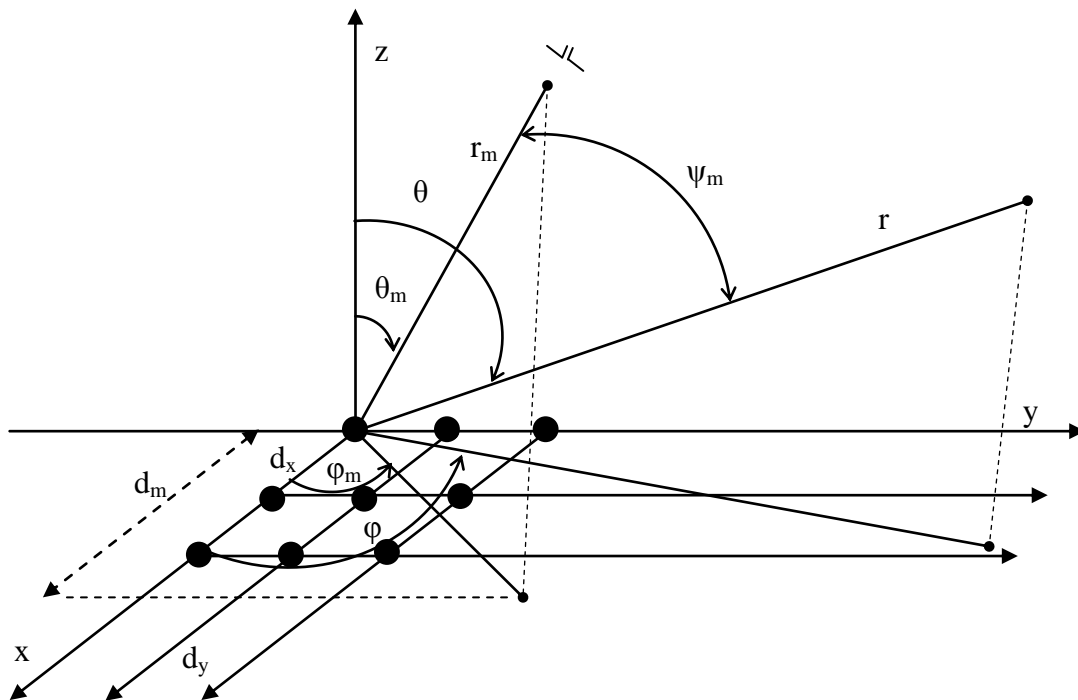


Σχήμα 1.9 Επίπεδη κεραία τεσσάρων διπολικών στοιχείων

### 1.3.1 Διάγραμμα ακτινοβολίας επίπεδης στοιχειοκεραίας

Οι επίπεδες στοιχειοκεραίες παρέχουν τη δυνατότητα ελέγχου και μορφοποίησης του διαγράμματος ακτινοβολίας. Τροποποιώντας μεταβλητές όπως η κατανομή του ρεύματος των στοιχείων ή η απόσταση μεταξύ των στοιχείων, είναι δυνατόν να σχεδιαστούν κεραίες με συγκεκριμένα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.

Για τον προσδιορισμό του παράγοντα ακτινοβολίας μιας επίπεδης κεραίας θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο του ακόλουθου σχήματος 1.10 [14]



Σχήμα 1.10 Γεωμετρία επίπεδης στοιχειοκεραίας

Ο παράγοντας ακτινοβολίας (Array Factor  $AF(\theta, \phi)$ ) ενός κεραιοσυστήματος  $N$  διπόλων δίνεται από την παρακάτω σχέση [9]:

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^N w_m c_m e^{jkr_m \cos \psi_m} \quad (1.1)$$

όπου

$c_m = \frac{I_m}{I_1}$  οι ρευματικοί συντελεστές των στοιχείων (excitation coefficients)

$I_1$  η ρευματική διέγερση του στοιχείου αναφοράς



$k = \frac{2\pi}{\lambda}$  ο κυματικός αριθμός

$\lambda$  το μήκος κύματος

$r_m, \psi_m$  όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1.10 και γωνία κλίσης, αντίστοιχα

$w_m = e^{j\delta_m}$  μιγαδικός φασικός συντελεστής βάρους για το στοιχείο  $m$  και  $\delta_m$  εκφράζει τη διαφορά φάσης μεταξύ διαδοχικών στοιχείων

Αναλυτικότερα για το  $\cos \psi_m$  ισχύει [14]

$$\cos \psi_m = \cos \theta_m \cos \theta + \sin \theta_m \sin \theta \cos(\phi - \phi_m) \quad (1.2)$$

και

$\theta_m, \phi_m$  η γωνία ανύψωσης και η αζιμουθιακή γωνία του στοιχείου  $m$

Ο παράγοντας ακτινοβολίας μιας γραμμικής στοιχειοκεραίας τα στοιχεία της οποίας βρίσκονται στον άξονα  $x$ , δίνεται από την παρακάτω σχέση [14]:

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^N w_m c_m e^{jkd_m \cos \psi_m} \quad (1.3)$$

όπου

$d_m$  όπως φαίνεται στο σχήμα 1.10

Η σχέση (1.2) μπορεί να απλοποιηθεί όταν τα δίπολα είναι τοποθετημένα στον άξονα  $x$  και θέτοντας  $\theta_m = 90^\circ, \phi_m = 0^\circ$  γίνεται

$$\cos \psi_m = \sin \theta \cos \phi \quad (1.4)$$

Επομένως ο παράγοντας ακτινοβολίας της κεραίας για το  $x$ - $y$  επίπεδο ( $\theta = 90^\circ$ ) δίνεται από την ακόλουθη σχέση [14]

$$AF(\phi) = \sum_{m=1}^N w_m c_m e^{jkd_m \cos \phi} \quad (1.5)$$

Η ένταση ακτινοβολίας για το οριζόντιο επίπεδο δίνεται από τη σχέση [14]:

$$U(\phi) = U_o(\theta = 90^\circ, \phi) \cdot |AF(\phi)|^2 \quad (1.6)$$

όπου

$U_o(\theta, \phi)$  η ένταση ακτινοβολίας ενός στοιχείου

Εάν θεωρηθεί ότι η στοιχειοκεραία αποτελείται από  $N$  δίπολα μήκους  $L$ , τότε η ένταση  $U_o$  δίνεται από τη σχέση [14]:

$$U_o(\theta) = A \left( \frac{\cos\left(k \frac{L}{2} \cos \theta\right) - \cos\left(k \frac{L}{2}\right)}{\sin \theta} \right)^2, \quad A \text{ σταθερά} \quad (1.7)$$

Τελικά, η ένταση ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο μιας στοιχειοκεραίας  $N$  διπόλων μήκους  $L$ , δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$U(\phi) = A \left( \frac{\cos\left(k \frac{L}{2} \cos \theta\right) - \cos\left(k \frac{L}{2}\right)}{\sin \theta} \right)^2 \left| \sum_{m=1}^N w_m c_m e^{jkd_m \cos \phi} \right|^2 \quad (1.8)$$

### 1.3.2 Υπολογισμός ίδιας και αμοιβαίας αντίστασης κεραίας

Ως αντίσταση εισόδου μιας κεραίας ορίζεται ο λόγος του ηλεκτρικού προς το μαγνητικό πεδίο σε σημείο της κεραίας ή η αντίσταση που παρουσιάζει στα σημεία τερματισμού της ή ο λόγος της τάσης προς το ρεύμα που εμφανίζεται στα σημεία τροφοδότησης της κεραίας [14]. Για τον καθορισμό της αντίστασης εισόδου και

χρησιμοποιώντας τα ισοδύναμα κυκλώματα για μια κεραία (σχήματα 1.11 α-γ & 1.12 α-γ) προκύπτει ότι είναι ίση με:

$$Z_A = (R_r + R_L) + jX_A \quad (1.9)$$

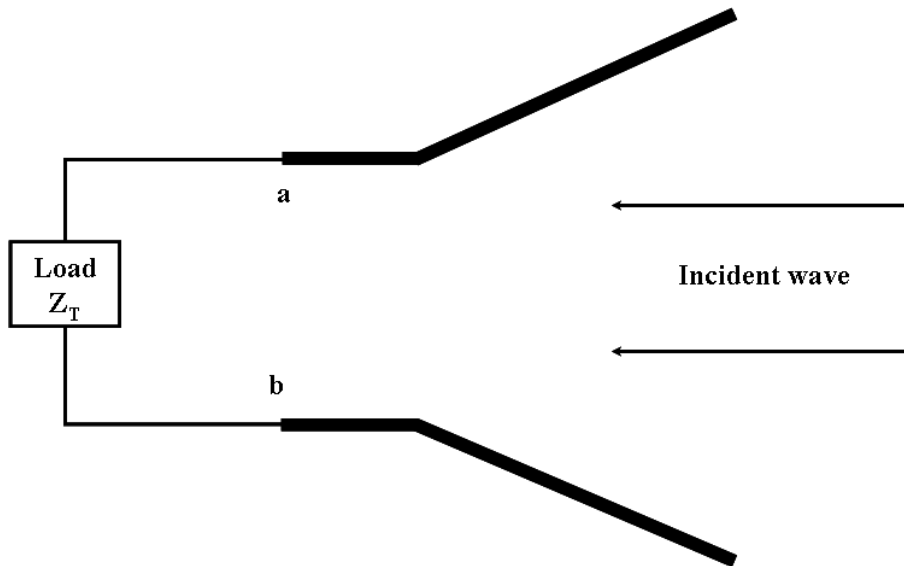
Η αντίσταση μιας κεραίας επηρεάζεται από ένα πλήθος παραγόντων όπως η συχνότητα λειτουργίας, η γεωμετρία της κεραίας, η μέθοδος τροφοδότησης και η απόσταση από τα γύρω αντικείμενα. Εξαιτίας της γεωμετρικής πολυπλοκότητας που παρουσιάζουν οι κεραίες, ένα πολύ μικρό κομμάτι τους έχει ερευνηθεί αναλυτικά σε ότι αφορά την αντίστασή τους. Για τις περισσότερες η αντίσταση καθορίζεται με πειραματική μέθοδο.

Για τον αναλυτικό καθορισμό της αντίστασης εισόδου υπάρχουν τρεις γενικές μέθοδοι που μπορούν να ακολουθηθούν: (α) μέθοδος οριακών συνθηκών (boundary-value method), (β) μέθοδος γραμμής μεταφοράς (transmission line method) και (γ) μέθοδος διανύσματος Poynting (Poynting vector method) [9]. Με τη μέθοδο οριακών συνθηκών, η οποία είναι η πιο βασική, η λύση προκύπτει εφαρμόζοντας τις οριακές συνθήκες. Ουσιαστικά ο μηδενισμός των εφαπτόμενων συνιστωσών του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια της κεραίας οδηγούν στον καθορισμό της ρευματικής κατανομής και τελικά της αντίστασης εισόδου. Το πλεονέκτημα της μεθόδου έγκειται στο γεγονός ότι δεν γίνεται καμία υπόθεση σχετικά με την κατανομή κάποιου μεγέθους. Αντιθέτως το μειονέκτημά της είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί πλήρως μόνο σε κεραίες με απλή γεωμετρία. Η δεύτερη μέθοδος θεωρεί και αναλύει την κεραία ως μια γραμμή μεταφοράς. Χρησιμοποιεί και πάλι το μηδενισμό του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια της κεραίας και γι αυτό το λόγο μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάγεται στην πρώτη κατηγορία. Η βασική ιδέα της τρίτης μεθόδου είναι η ολοκλήρωση του διανύσματος Poynting σε μια κλειστή επιφάνεια. Η κλειστή αυτή επιφάνεια είναι συνήθως είτε μια σφαίρα με πολύ μεγάλη διάμετρο

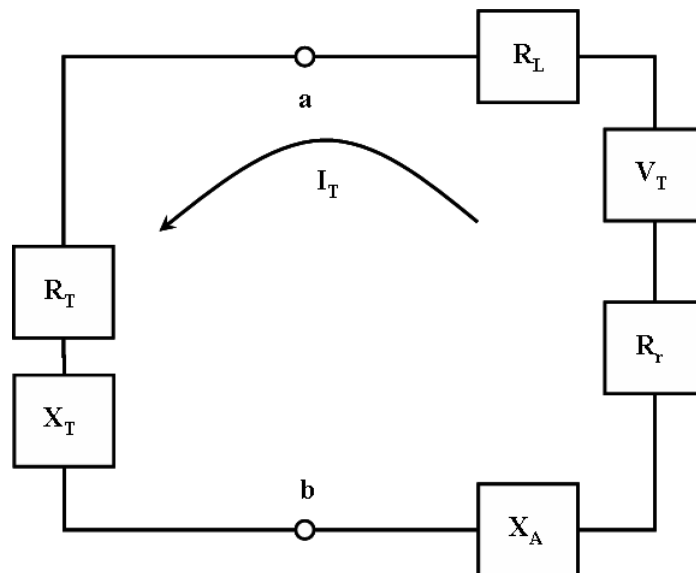
$$r \geq (2D^2 / \lambda) \quad (1.10)$$

όπου D η μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας, είτε μια επιφάνεια που συμπίπτει με την επιφάνεια της κεραίας.

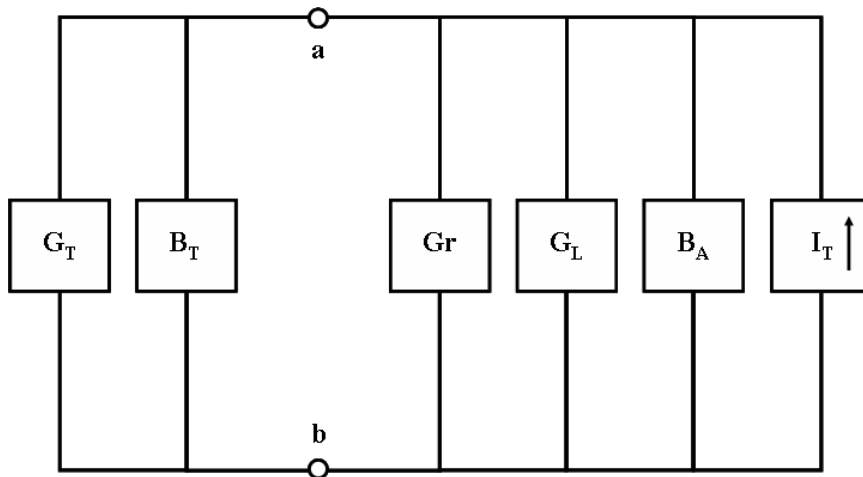
Με τη μέθοδο της σφαίρας υπολογίζεται μόνο το πραγματικό μέρος της αντίστασης εισόδου. Η μέθοδο που χρησιμοποιεί την επιφάνεια της κεραίας καθορίστηκε ως μέθοδος της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Induced EMF Method) και αναλύεται παρακάτω στην παράγραφο 1.3.3. Η αντίσταση εισόδου μπορεί επίσης να προσδιοριστεί και με τη χρήση ολοκληρωτικού λογισμού (Integral Equation method). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο



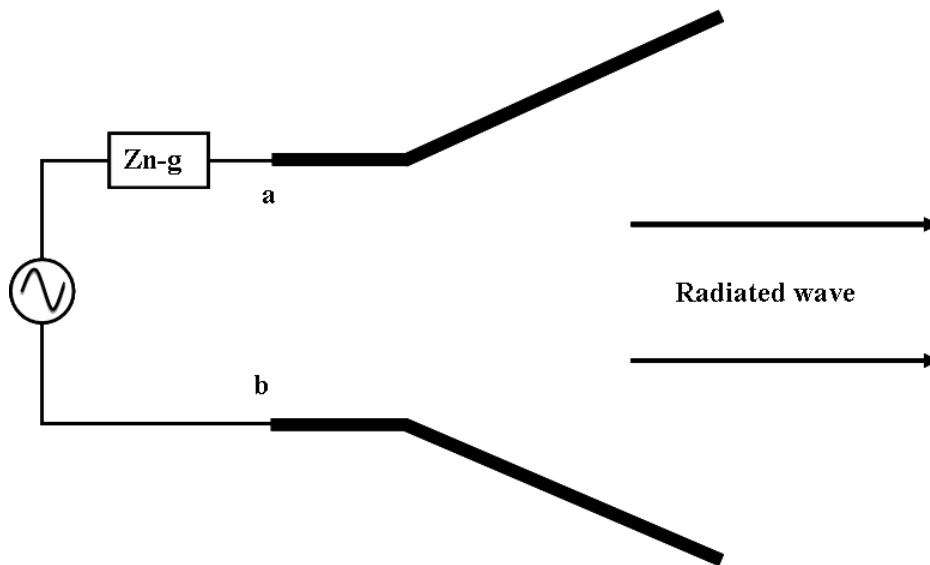
Σχήμα 1.11α Κεραία σε κατάσταση λήψης



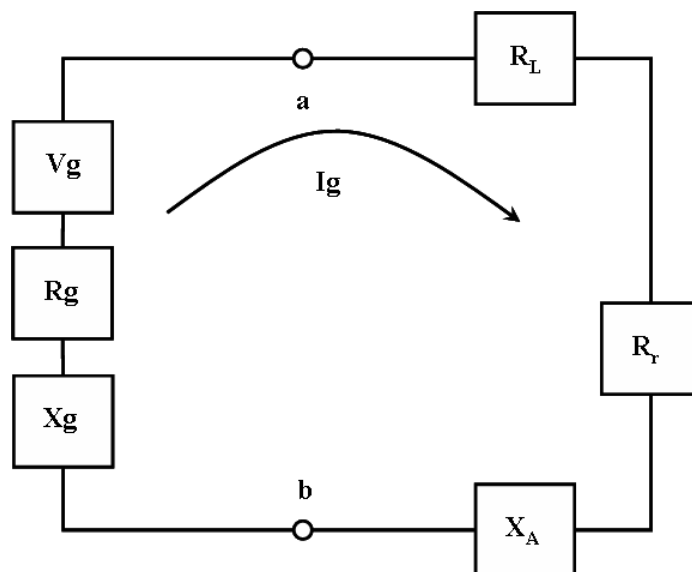
Σχήμα 1.11β Κεραία σε κατάσταση λήψης-Ισοδύναμο Thevenin



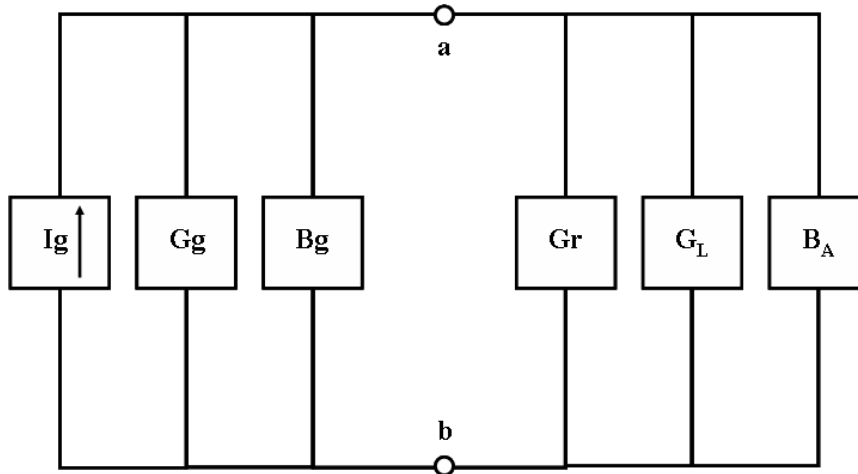
Σχήμα 1.11γ Κεραία σε κατάσταση λήψης-Ισοδύναμο Norton



Σχήμα 1.12α Κεραία σε κατάσταση εκπομπής



Σχήμα 1.12β Κεραία σε κατάσταση εκπομπής-Ισοδύναμο Thevenin



Σχήμα 1.12γ Κεραία σε κατάσταση εκπομπής-Ισοδύναμο Norton

επιλύονται ολοκληρωτικές εξισώσεις με τη χρήση μαθηματικών τεχνικών. Στη βιβλιογραφία η τεχνική αυτή αναφέρεται ως Integral Equation Method of Moments και χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων τη δεκαετία του 1960, είναι απλή, ευέλικτη αλλά απαιτεί μεγάλο πλήθος υπολογισμών. Η ταχύτητά της εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα και αποθηκευτικό χώρο του υπολογιστή που χρησιμοποιείται. Στην παράγραφο 1.3.4 αναπτύσσονται δύο δημοφιλείς ολοκληρωτικές εξισώσεις, η ολοκληροδιαφορική εξίσωση του Rocklington και η ολοκληρωτική εξίσωση του Hallén.

### 1.3.3 Υπολογισμός ίδιας και αμοιβαίας αντίστασης στοιχειοκεραίας με τη μέθοδο της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Induced EMF Method)

Η μέθοδος επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Induced EMF method) είναι μια κλασική μέθοδος υπολογισμού της ίδιας και της αμοιβαίας αντίστασης (self and mutual impedance) διπόλων. Περιορίζεται σε γραμμικές κεραίες, παράλληλες μεταξύ τους, συγγραμμικές ή με υψομετρική διαφορά, και υποθέτει ημιτονοειδείς ρευματικές κατανομές επί των διπόλων.

Οι ρευματικές διεγέρσεις  $I_m$  ( $m=1, \dots, N$ ) των στοιχείων (λόγω αμοιβαίας επαγωγής και τα παρασιτικά στοιχεία διαρρέονται από ρεύμα) σχετίζονται με τα αναπτυσσόμενα δυναμικά με βάση τον πίνακα εμπέδησης  $Z$  [14]:

$$V = Z \cdot I \quad (1.11)$$

όπου είναι

$$V = [V_1 \quad \dots \quad V_N]^{-1}, I = [I_1 \quad \dots \quad I_N]^{-1} \text{ και } Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

Η αναπτυσσόμενη τάση στα ενεργά στοιχεία μπορεί να θεωρηθεί ίση με μια σταθερή τιμή ενώ στα παρασιτικά στοιχεία μπορεί να θεωρηθεί μηδενική. Επομένως η ψηφιακή κωδικολέξη που οδηγεί το κύκλωμα τροφοδότησης των στοιχείων μιας κεραίας ενεργών και παρασιτικών διπόλων, εκφράζει το κανονικοποιημένο διάνυσμα τάσης.

Από τις σχέσεις (1.11) και (1.12) προκύπτει ότι το αναπτυσσόμενο δυναμικό σε ένα οποιοδήποτε στοιχείο μπορεί να εκφραστεί σε συνάρτηση με τη ρευματική διέγερση όλων των στοιχείων [14]:

$$V_n = \sum_{m=1}^N Z_{nm} I_m \quad n=1, \dots, N \quad (1.13)$$

όπου  $Z_{nm}$  μπορεί να είναι η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των στοιχείων  $n, m$  ( $n \neq m$ ) ή η αυτεπαγωγή του στοιχείου  $m$  ( $n = m$ ).

Η ίδια αντίσταση  $Z_i$  ενός διπόλου μήκους  $L$  που αναφέρεται στο ρεύμα βάσης  $I_i$ , δίνεται από την ακόλουθη σχέση [14]:

$$Z_i = -\frac{1}{I_i^2} \int_{-L/2}^{L/2} E_z(\rho = a, z) I(z) dz \quad (1.14)$$

όπου

$$I(z) = I_m \sin \left[ k \left( \frac{L}{2} - |z| \right) \right] \quad (1.15)$$

η ημιτονοειδής ρευματική κατανομή στο δίπολο

$E_z$  η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου της κοντινής περιοχής που προκαλεί η κεραία όταν βρίσκεται στον κενό χώρο

$a$  η ακτίνα του διπόλου

$I_m$  η μέγιστη τιμή του ρεύματος επί του διπόλου

Η αμοιβαία αντίσταση μεταξύ δυο παράλληλων διπόλων που βρίσκονται σε απόσταση  $d$ , δίνεται από την ακόλουθη σχέση [14]

$$Z_{21i} = \frac{V_{21}}{I_{1i}} = -\frac{1}{I_{1i}I_{2i}} \int_{-L_2/2}^{L_2/2} E_{z21}(z)I_2(z)dz \quad (1.16)$$

όπου

$V_{21}$  η επαγόμενη τάση στο δεύτερο δίπολο λόγω της ρευματικής κατανομής στο πρώτο δίπολο

$E_{z21}$  η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του δεύτερου διπόλου που προκαλείται από την ακτινοβολία του πρώτου διπόλου

$I_2$  η ρευματική κατανομή του δεύτερου διπόλου στο σημείο τροφοδότησης

Από τις εξισώσεις (1.14) - (1.16), η ίδια όσο και η αμοιβαία αντίσταση μπορούν να εκφραστούν σε συνάρτηση των λόγων  $\frac{L}{\lambda}, \frac{a}{\lambda}$  και  $\frac{L_1}{\lambda}, \frac{L_2}{\lambda}, \frac{d}{\lambda}$ , αντίστοιχα.

Να σημειωθεί και πάλι ότι για την επίλυση του προβλήματος με αυτή τη μέθοδο, η ρευματική κατανομή των ενεργών στοιχείων θεωρείται ημιτονοειδής ενώ το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται από δίπολα που θεωρούνται ότι έχουν μικρή αλλά καθορισμένη ακτίνα (τυπική τιμή μικρότερη από  $\lambda/200$ ).

#### 1.3.4 Αμοιβαία αντίσταση μεταξύ ενεργών και παρασιτικών στοιχείων

Όπως αναλύθηκε και στην παραπάνω παράγραφο, όταν δυο ακτινοβολούντα στοιχεία βρεθούν το ένα κοντά στο άλλο, αλληλοεπηρεάζονται. Η ακτινοβολούμενη ισχύς ενός στοιχείου μεταβάλλει την αρχική ρευματική κατανομή του γειτονικού του και επομένως την αντίσταση των στοιχείων και τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας τους. Στην παρούσα παράγραφο θα αναλυθεί η αμοιβαία αντίσταση μεταξύ στοιχείων κάποια εκ των οποίων είναι ενεργά και κάποια παρασιτικά. Για την παραπέρα



ανάλυση θα θεωρηθεί το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin του παρακάτω σχήματος 1.13.

Από το κύκλωμα ισχύει

$$V_2 = -Z_{L2} \cdot I_2 \quad (1.17)$$

Με βάση την εξίσωση (1.11) ισχύει

$$V_1 = Z_{11} \cdot I_1 + Z_{12} \cdot I_2 \quad (1.18)$$

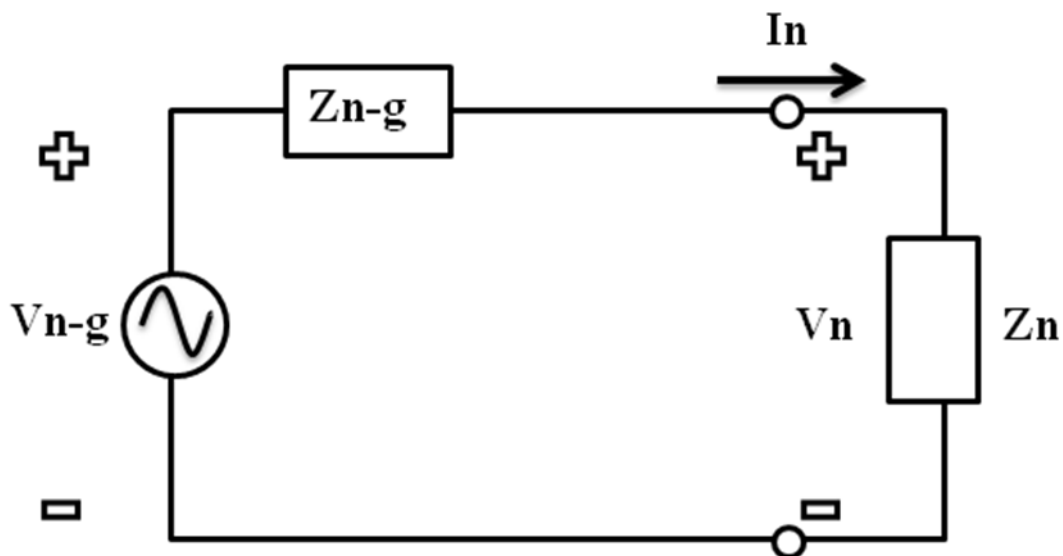
$$-Z_{L2} \cdot I_2 = Z_{21} \cdot I_1 + Z_{22} \cdot I_2 \quad (1.19)$$

οπότε

$$V_1 = Z_{11} \cdot I_1 + Z_{12} \cdot I_2 \quad (1.20)$$

$$0 = Z_{21} \cdot I_1 + (Z_{22} + Z_{L2}) \cdot I_2 \quad (1.21)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις και επεκτείνοντάς τις για σύστημα με ένα ενεργό στοιχείο και N παρασιτικά στοιχεία, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση.



Σχήμα 1.13 Ισοδύναμο Thevenin κύκλωμα

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} + Z_{L2} & \dots & Z_{2N} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{NN} + Z_{LN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ I_N \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

και σε πιο απλή μορφή

$$V = [Z + Z_L] \cdot I \quad (1.23)$$

όπου

$$Z_L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Z_{L2} & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & Z_{LN} \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

ο πίνακας που περιλαμβάνει τα φορτία των παρασιτικών στοιχείων.

### 1.3.5 Μέθοδος των ροπών (ολοκληρωτικές εξισώσεις)

Οι ολοκληρωτικές εξισώσεις διακρίνονται σε ηλεκτρικού πεδίου (EFIE – Electric Field Integral Equation), και μαγνητικού πεδίου (MFIE – Magnetic Field Integral Equation). Για προβλήματα ακτινοβολίας, ειδικότερα κεραιών σύρματος (wire antennas), δύο δημοφιλείς EFIE's είναι η ολοκληροδιαφορική εξίσωση του Rocklington και η ολοκληρωτική εξίσωση του Hallén.

Η μέθοδος των ροπών χρησιμοποιείται για την αριθμητική επίλυση ολοκληρωτικών εξισώσεων (integral equations), με στόχο τον υπολογισμό μιας άγνωστης ρευματικής κατανομής και την αντίσταση εισόδου μιας κεραίας. Η εξίσωση περιλαμβάνει το ηλεκτρικό πεδίο  $E_{z21}(z)$  της (1.14) ως προς το οποίο επιλύεται.

Αναλυτικότερα η εξίσωση του Rocklington προκύπτει από την επιβολή της οριακής συνθήκης για το μηδενισμό του συνολικού εφαπτομενικού πεδίου στην επιφάνεια ενός τέλει αγωγού. Ύστερα από εκτεταμένη ανάλυση και υποθέτοντας πολύ λεπτό αγωγό ( $a \ll \lambda$ ), καταλήγει κανείς στην ακόλουθη εξίσωση [14]:

$$\int_{-L/2}^{L/2} I_z(z') \left[ \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) G(z, z') \right] dz' = -j\omega \epsilon E_z^i(\rho = a) \quad (1.25)$$

όπου  $I_z(z')$  η ισοδύναμη νηματοειδής ρευματική κατανομή στην επιφάνεια του διπόλου και κατά μήκος του κεντρικού άξονα του αγωγού,  $E_z^i$  το προσπίπτον ηλεκτρικό πεδίο,  $a$  η ακτίνα και  $L$  το μήκος του αγωγού, και  $G(z, z') = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R}$ ,  $R = \sqrt{a^2 + (z - z')^2}$ . Το σημείο  $z$  είναι σημείο παρατήρησης επί της επιφάνειας του αγωγού και το σημείο  $z'$  είναι σημείο ολοκλήρωσης επί του κεντρικού άξονα του αγωγού. Από την (1.25) μπορεί να βρεθεί η ρευματική κατανομή  $I_z(z')$  και επομένως η ρευματική κατανομή σε όλο το δίπολο, γνωρίζοντας το πεδίο στην επιφάνεια του αγωγού. Η διαδικασία επίλυσης στοχεύει στην εφαρμογή οριακών συνθηκών στην επιφάνεια του διπόλου όπως προαναφέρθηκα αλλά είναι δυνατόν να εφαρμοστεί και στο κέντρο του.

Με ανάλογη διαδικασία και επιβολή των οριακών συνθηκών για τέλει αγωγό (μηδενισμός του συνολικού εφαπτομενικού πεδίου στην επιφάνεια, μηδενισμός του ρεύματος στα άκρα), προκύπτει και η εξίσωση του Hallén.

$$\int_{-L/2}^{L/2} I_z(z') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dz' = -j \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} [B_1 \cos(kz) + C_1 \sin(k|z|)] \quad (1.26)$$

όπου  $B_1$  και  $C_1$  σταθερές τιμές

Οι (1.25) και (1.26) αποτελούν εξισώσεις γραμμικού τελεστή (linear-operator equation) και γράφεται στη μορφή [14]

$$Lf = e \quad (1.27)$$

όπου  $f$  η άγνωστη ρευματική κατανομή,  $e$  μια γνωστή διέγερση, και  $L$  ένας γραμμικός τελεστής (ολοκλήρωμα στην προκειμένη περίπτωση).

Για την επίλυση της (1.25), η μέθοδος των ροπών προβλέπει τη διαίρεση του αγωγού σε  $N$  μη επικαλυπτόμενα τμήματα (segments) και την ανάλυση της  $f$  σε ένα άθροισμα  $N$  γνωστών συναρτήσεων  $f_j$ , που καλούνται συναρτήσεις βάσης (basis ή expansion functions) [14]:

$$f = \sum_{j=1}^N \alpha_j f_j \quad (1.28)$$

όπου  $\alpha_j$  άγνωστοι σταθεροί συντελεστές. Οι πιο συνηθισμένες συναρτήσεις βάσης είναι οι σταθερές (piecewise constant), οι γραμμικές (piecewise linear), και οι ημιτονοειδείς (piecewise sinusoid).

Από τις (1.25) και (1.26), έχουμε: [14]

$$\sum_{j=1}^N \alpha_j (L f_j) = e \quad (1.29)$$

Για τον υπολογισμό των  $N$  αγνώστων  $\alpha_j$ , απαιτούνται  $N$  εξισώσεις. Για το σκοπό αυτό, εφαρμόζεται η (1.27) σε  $N$  διαφορετικά σημεία στην επιφάνεια του αγωγού (point-matching ή collocation). Έτσι, προκύπτει  $N \times N$  σύστημα εξισώσεων το οποίο και μπορεί να επιλυθεί αναλυτικά και να προσδιοριστούν οι  $N$  άγνωστοι  $\alpha_j$ .

Για βελτίωση της λύσης του  $N \times N$  συστήματος, μπορεί στην (1.27) να ληφθεί το ακόλουθο εσωτερικό γινόμενο [14]

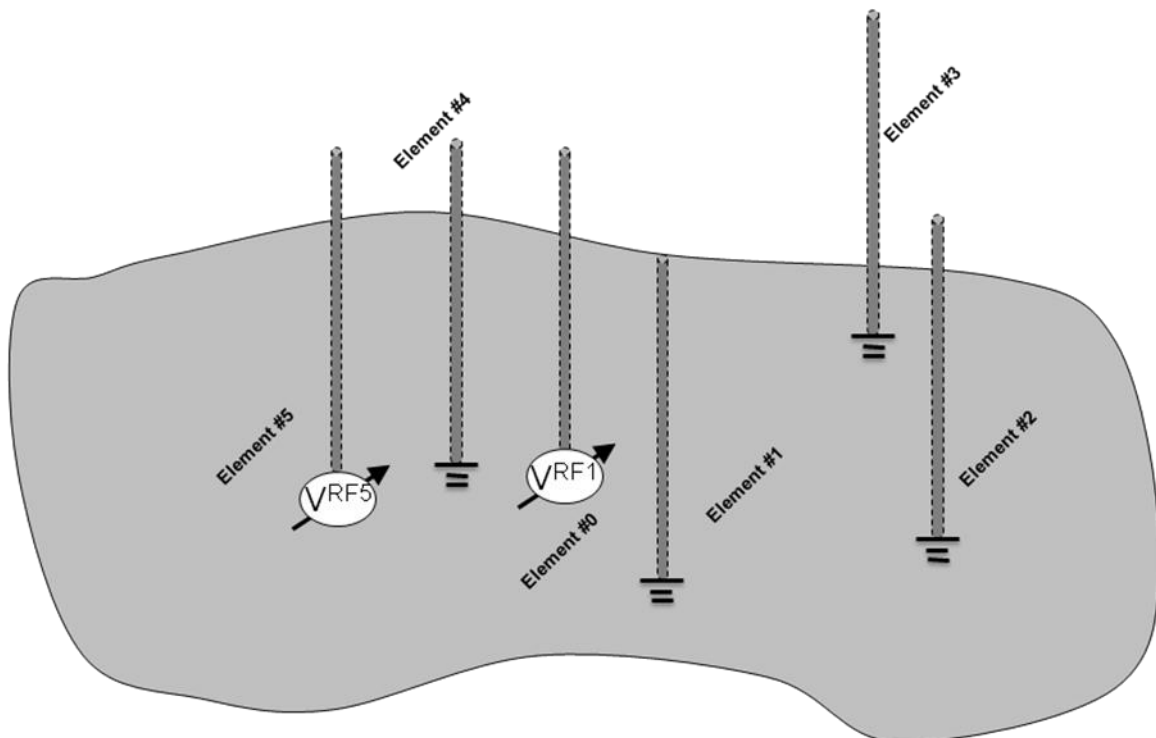
$$\langle w_i, L f \rangle = \langle w_i, e \rangle \quad (1.30)$$

όπου  $\{w_i\}$  είναι ένα σετ συναρτήσεων βάρους (weighting functions). Τυπικές weighting functions είναι οι συναρτήσεις δέλτα.

### 1.3.6 Διαμόρφωση δέσμης με ενεργά και παρασιτικά στοιχεία

Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζονται και χρησιμοποιούνται στοιχειοκεραίες με ενεργά και παρασιτικά στοιχεία που έχουν τη γενική δομή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.14. Στη περίπτωση αυτή τα στοιχεία είναι είτε δίπολα είτε μονόπολα, κάποια από τα οποία είναι συνδεδεμένα με πηγές ενώ τα υπόλοιπα είναι βραχυκυκλωμένα. Στην περίπτωση των μονοπόλων που φαίνεται και στο σχήμα 1.14, θεωρείται ότι βρίσκονται πάνω από τέλεια αγωγίμο, άπειρο σε διάσταση, επίπεδο.

Η επαγωγή μεταξύ ενεργών και παρασιτικών στοιχείων προσδίδει στη στοιχειοκεραία ενδιαφέροντα στοιχεία. Με βάση το σύνολο των παραπάνω εξισώσεων φαίνεται ότι η σχετική θέση των στοιχείων, η ρευματική κατανομή στο κάθε στοιχείο καθώς και η παρουσία ή μη φορτίου, επηρεάζει άμεσα τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Επομένως με κατάλληλη επιλογή των θέσεων των στοιχείων, των συνθηκών τροφοδότησής τους και του ελέγχου των συνδεδεμένων φορτίων μπορεί να γίνει συνολικός έλεγχος των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας του κεραιοσυστήματος.



Σχήμα 1.14 Στοιχειοκεραία ενεργών-παρασιτικών στοιχείων

## 1.4 Βιβλιογραφία

1. <http://www.gsm.org>, Απρίλιος 2008
2. <http://www.gsacom.com>, Απρίλιος 2008
3. A. Lozano, F. R. Farrokhi, R. A. Valenzuela, “Lifting the limits on high-speed wireless data access using antenna arrays”, *IEEE Communications Magazine*, pp 156-162, September 2001
4. G. F. Foschini, M. J. Gans, “On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas”, *Wireless Personal Communications*, Kluwer Academic Publishers, no. 6, pp. 311-335, 1998
5. H. Ming-Ju, G. L. Stuber, M. D. Austin, “Performance of switched-beam smart antennas for cellular radio systems”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 47, Issue 1, pp 10-19, Feb. 1998
6. Tiong Sieh Kiong, M. Ismail, A. Hassan, “WCDMA downlink capacity improvement by using smart antenna”, *13th IEEE International Conference on Networks*, Vol. 2, pp. 5, Nov. 2005
7. J. Fuhl, A. Kuchar, E. Bonek, “Capacity increase in cellular PCS by smart antennas”, *IEEE 47th Vehicular Technology Conference*, Vol. 3, pp. 1962-1966, May 1997
8. G. Okamoto, “Developments and Advances in Smart Antennas for Wireless Communications”, Business Report, *Wireless Technology magazine*, 2003
9. R. Martinez, D. Trosa, L. de Haro, M. Calvo, “Smart antennas performance evaluation and capacity increase for WCDMA UMTS”, *IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol. 1, pp. 147-151, 2001
10. P. H. Lehne, M. Pettersen, “An overview of smart antenna technology for mobile communications systems”, *IEEE Communications Surveys*, pp 2-13, vol 2, no 4, Fourth Quarter 1999
11. A. Jacobsen, “Smart antennas for dummies”, R&D report April 2001
12. Web Proforum Tutorials, <http://eee.iec.org>, “Smart Antenna Systems”
13. C.J. Liberti, T.S. Rappaport, *Smart Antennas for Wireless Communications : IS-95 and Third Generation CDMA Applications*, Prentice Hall, 1999
14. C. A. Balanis, *Antenna theory, analysis and design*, John Wiley and Sons, Third Edition, 2005







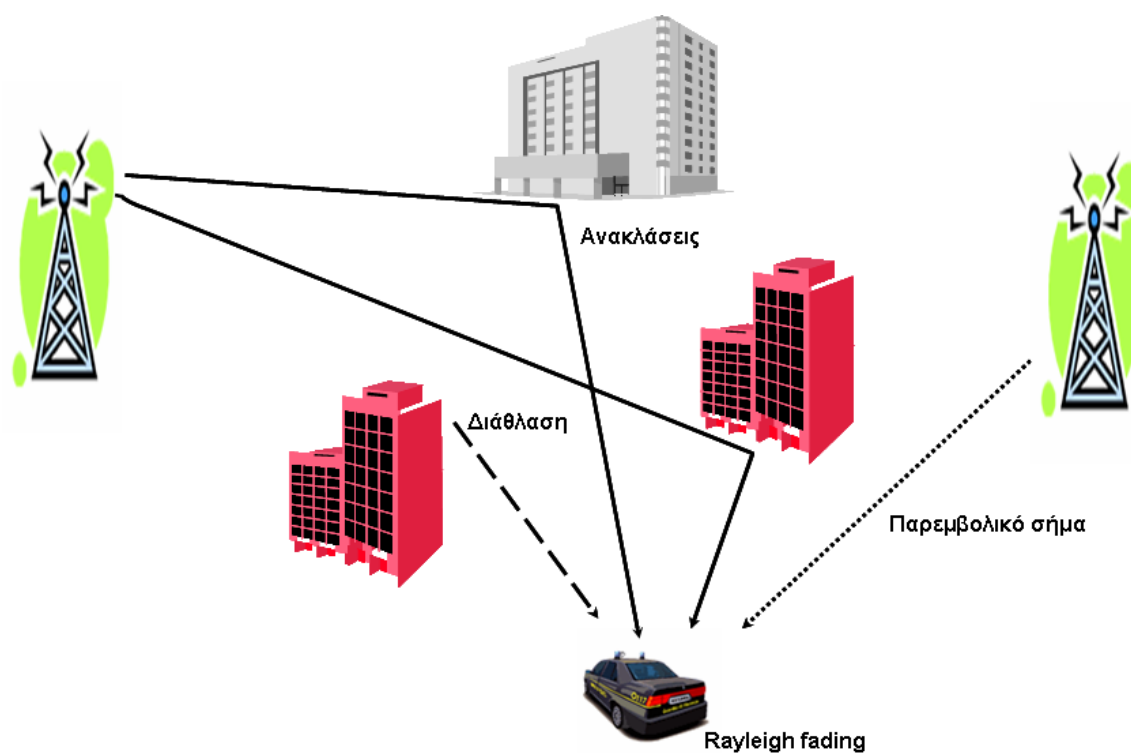
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΠΙΛΟΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

#### 2.1 Γενικά στοιχεία-Περιορισμοί

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ανάγκη για αυξημένη χωρητικότητα στα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, έχει ενεργοποιήσει ερευνητικά προγράμματα με σκοπό την ανάπτυξη αλγορίθμων και μεθόδων που θα εκμεταλλευτούν την τεχνική της διαφορικής λήψης - εκπομπής χώρου (SDMA). Επακολούθως, γίνονται πολλές προσπάθειες στη σχεδίαση ευφυών κεραιοσυστημάτων και κατάλληλων αλγορίθμων διαμόρφωσης δέσμης. Οι ευφυής κεραιές δίνουν τη δυνατότητα για αύξηση του κέρδους ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος, βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσιών (Quality-of-Service QoS), βελτιωμένο έλεγχο ισχύος εκπομπής και τελικά βέλτιστη διαχείριση της κατανάλωσης ισχύος στις τερματικές συσκευές [1].

Τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, παρουσιάζουν περιορισμούς τόσο στην απόδοση όσο και στη διαθέσιμη χωρητικότητά τους για τρεις κύριους βασικούς λόγους οι οποίοι φαίνονται και στο ακόλουθο σχήμα 2.1 [2-6].



Σχήμα 2.1 Περιορισμοί στην απόδοση των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων

Ο πρώτος παράγοντας είναι οι διαλείψεις λόγω πολλαπλών οδεύσεων (multipath fading) που οφείλεται στα πολλαπλά μονοπάτια που ακολουθεί το εκπεμπόμενο σήμα μέχρι να φτάσει στο δέκτη. Τα σήματα αυτά έχουν διαφορετικές φάσεις και πλάτη, με αποτέλεσμα το συνολικά λαμβανόμενο σήμα που προκύπτει από την άθροιση των επιμέρους σημάτων, να έχει αυξομειούμενο πλάτος και φάση ανάλογα με τη θέση της κεραίας, τη διεύθυνση, την πολικότητα και το χρόνο [7]. Να σημειωθεί ότι για ένα σύστημα που λειτουργεί στη ζώνη των 2GHz και για τερματική συσκευή που κινείται με 60m/h ταχύτητα, προκαλείται ένας ρυθμός διαλείψεων της τάξης των 179 Hz. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε αύξηση της απαιτούμενης μέσης λαμβανόμενης ισχύος για συγκεκριμένο ρυθμό λαθών (Bit Error Rate BER). Για την ελαχιστοποίηση των προβλημάτων έχουν προταθεί και εφαρμοστεί πλήθος λύσεων [8].

Ο δεύτερος παράγοντας που θέτει περιορισμούς στα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα είναι η καθυστέρηση διάδοσης (delay spread). Προκαλείται λόγω της διαφορετικής διαδρομής που πρέπει να ακολουθήσουν τα σήματα μέχρι να φτάσουν στο δέκτη. Όταν η καθυστέρηση διάδοσης είναι μεγαλύτερη από το 10% της διάρκειας του συμβόλου, σημαντική ενδοσυμβολική παρεμβολή μπορεί να εμφανιστεί και να περιορίσει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

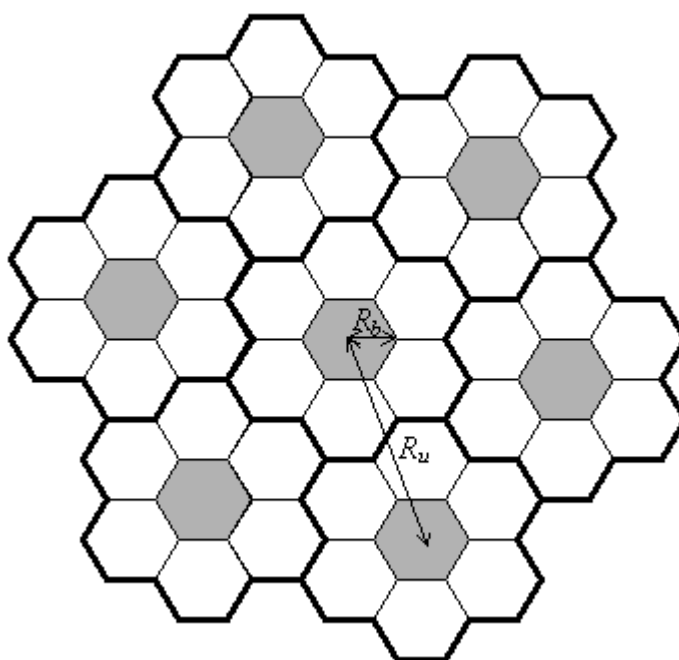
Ο τελευταίος παράγοντας είναι οι ομοδιαυλικές παρεμβολές (co-channel interference). Στα κυψελωτά συστήματα, τα κανάλια συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται, χωρίζονται σε ομάδες και κάθε κυψέλη μπορεί να χρησιμοποιήσει μια συγκεκριμένη ομάδα. Η επαναχρησιμοποίηση της ίδιας ομάδας συχνοτήτων καθορίζεται από τον παράγοντα επαναχρησιμοποίησης (frequency reuse factor) που συνήθως έχει τιμή ίση με 7. Αποτέλεσμα είναι η παρουσία ομοδιαυλικής παρεμβολής η οποία αυξάνεται όταν το πλήθος των ομάδων συχνοτήτων ελαττώνεται.

Τα ευφυή κεραιοσυστήματα μπορούν να θεωρηθούν ως μια επέκταση των κυψελωτών συστημάτων με τη διαφορά ότι κάθε μια κυψέλη αποτελείται από πολλαπλές δέσμες. Κύριο χαρακτηριστικό των έξυπνων κεραιών είναι η διαμόρφωση εξαιρετικά κατευθυντικού διαγράμματος ακτινοβολίας. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η απομόνωση του χρήστη ενδιαφέροντος ενώ παράλληλα αγνοούνται τα σήματα παρεμβολής. Επομένως, επιτρέπεται η επικοινωνία του χρήστη με το σταθμό βάσης με πολύ μικρότερη ισχύ εκπομπής και σε συνδυασμό με την

αντίστοιχη μείωση εκπεμπόμενης ισχύος από το σταθμό βάσης οδηγείται το σύστημα σε ελάττωση των ομοδιαυλικών παρεμβολών. Όλα αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω συντείνουν στο γεγονός ότι με τη χρησιμοποίηση ευφών κεραιοσυστημάτων σε ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη κάλυψη από κάθε σταθμό βάσης. Ταυτόχρονα, καθώς οι παρεμβολές μπορούν να απορριφθούν, χαμηλότερος ρυθμός λαθών είναι δυνατόν να επιτευχθεί και επομένως σημαντική αύξηση στη χωρητικότητα του συστήματος είναι εφικτή με παράλληλη αύξηση του ρυθμού μετάδοσης. Τα τρία τελευταία πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν σχετικά με την αύξηση της κάλυψης, χωρητικότητας και του ρυθμού μετάδοσης, θα αναλυθούν περισσότερο στις ακόλουθες παραγράφους.

## 2.2 Πλεονεκτήματα χρήσης ευφών κεραιοσυστημάτων

Η διατήρηση της διαθέσιμης χωρητικότητας ενός συστήματος τηλεπικοινωνιών είναι πάντα μια πρόκληση καθώς ο αριθμός των χρηστών και των υπηρεσιών αυξάνεται διαρκώς. Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της διαθέσιμης χωρητικότητας, ο τρόπος σχεδιασμού των κυψελωτών δικτύων άλλαξε με την πάροδο των χρόνων. Από τις πρώτες ημέρες, οι σχεδιαστές γνώριζαν ότι η χωρητικότητα θα αποτελούσε σε κάποια χρονική στιγμή ένα προβληματικό σημείο. Τον ισχυρισμό αυτό ενίσχυε το γεγονός ότι το πλήθος των καναλιών-συχνοτήτων που είχαν καθοριστεί από την Federal Communications Commission (FCC) ήταν περιορισμένο. Επομένως μια κατάλληλη δομή κυψελωτού δικτύου έπρεπε να σχεδιαστεί και να αναπτυχθεί



Σχήμα 2.2 Δομή κυψελωτού συστήματος

όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2. Κάθε εξαγωνική επιφάνεια αντιπροσωπεύει μια γεωγραφική περιοχή, το κελλί (cell), με μέγιστη ακτίνα  $R_b$ . Στο κέντρο του κελιού βρίσκεται ο σταθμός βάσης στον οποίο είναι εγκατεστημένη μια πανκατευθυντική κεραία και μπορεί να διαχειριστεί ένα συγκεκριμένο πλήθος συχνοτήτων. Σταθμοί βάσεις σε γειτονικά κελιά διαχειρίζονται διαφορετικά σετ συχνοτήτων. Περιορίζοντας την καλυπτόμενη περιοχή μέσα στα όρια του κελιού, το ίδιο σετ συχνοτήτων μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για κάποιο άλλο σταθμό βάσης ο οποίος θα βρίσκεται σε τέτοια απόσταση ώστε οι παρεμβολές να μην αποτελούν πρόβλημα. Η διαδικασία απόδοσης συχνοτήτων σε ένα σταθμό βάσης με επαναχρησιμοποίηση, αναφέρεται και ως frequency reuse technique. Το σύνολο των σταθμών που γειτνιάζουν και χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες αποτελούν ένα cluster. Στο σχήμα 2.2 ο γκρι σταθμός μαζί με του έξι που βρίσκονται γύρω του αποτελούν ένα cluster. Επομένως το cluster size είναι ίσο με 7. Οι σταθμοί με γκρι χρώμα έχουν το ίδιο σετ συχνοτήτων. Ο βαθμός επαναχρησιμοποίησης (co-channel reuse ratio) προσδιορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

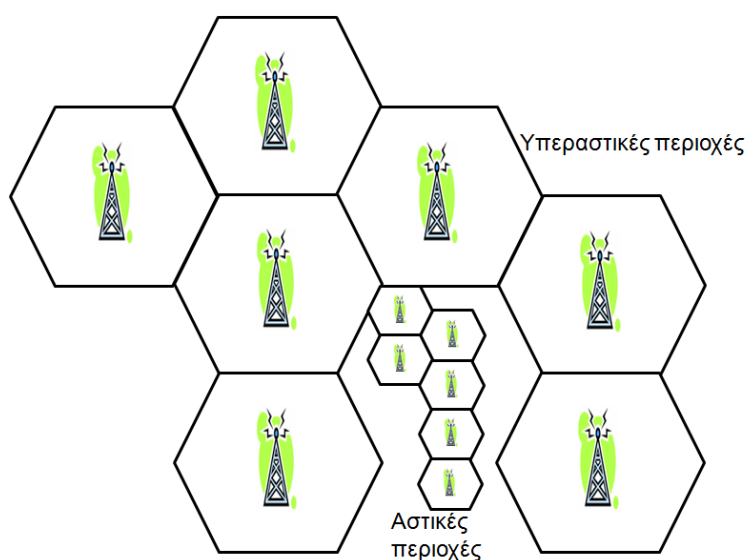
$$\frac{R_u}{R_b} = \sqrt{3N_c} \quad (2.1)$$

όπου  $R_u$  η απόσταση μεταξύ των δύο πλησιέστερων κελιών που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες,  $R_b$  η ακτίνα του κελιού και  $N_c$  ακέραιος αριθμός που δηλώνει το cluster size [9-12].

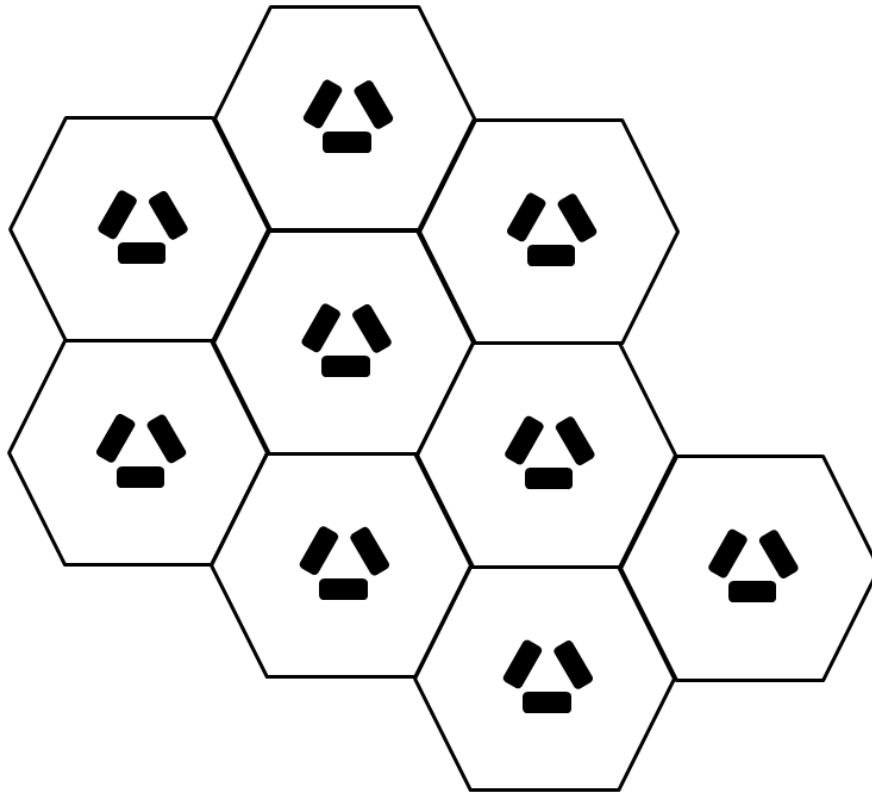
### 2.2.1 Αύξηση χωρητικότητας τηλεπικοινωνιακού συστήματος

Με βάση τη δομή του σχήματος 2.2, γίνεται αντιληπτό ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό της συνολικά εκπεμπόμενης ενέργειας φτάνει στον χρήστη ενδιαφέροντος. Το υπόλοιπο τμήμα της ενέργειας που εκπέμπεται από την πανκατευθυντική κεραία δρα ουσιαστικά σαν παρεμβολέας στο υπόλοιπο περιβάλλον, μειώνοντας τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος. Μια άμεση λύση στο συγκεκριμένο θέμα αποτελεί η τεχνική cell splitting (σχήμα 2.3) με βάση την οποία διαιρείται ένα cell σε μικρότερα microcells, το κάθε ένα με το δικό του σταθμό βάσης και μικρότερη ισχύ εκπομπής καθώς η περιοχή κάλυψης είναι μικρότερη. Η τεχνική αυτή βελτιώνει τη χωρητικότητα του συστήματος μειώνοντας την ακτίνα του κελιού και διατηρώντας

σταθερό το βαθμό επαναχρησιμοποίησης. Τα μειονεκτήματα της τεχνικής αυτής έγκειται στο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας νέων σταθμών βάσης, την αύξηση του ρυθμού handoffs και την αυξημένη υπολογιστική ισχύ που πλέον απαιτείται ανά χρήστη. Καθώς νέες υπηρεσίες αναπτύσσονται με μεγαλύτερες ανάγκες σε χωρητικότητα, τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα βρέθηκαν ανεπαρκή για να καλύψουν τις ανάγκες των χρηστών. Επομένως αναζητήθηκαν νέες τεχνικές που να αποδίδουν περισσότερες συχνότητες ανά καλυπτόμενη περιοχή. Η νέα τεχνική ονομάστηκε cell sectoring και φαίνεται στο σχήμα 2.4. Η πανκατευθυντική κεραία έχει αντικατασταθεί πλέον από κατευθυντικές κεραίες. Σε μια τυπική διάταξη, ένας σταθμός πλέον διαθέτει τρεις sectors από  $120^\circ$  ο κάθε ένας. Ακολουθώντας την τεχνική αυτή, η χωρητικότητα βελτιώνεται, η ακτίνα του cell παραμένει η ίδια και ο βαθμός επαναχρησιμοποίησης μειώνεται. Επί της ουσίας, μειώνοντας τον αριθμό των cells σε ένα cluster και επομένως μειώνοντας το βαθμό επαναχρησιμοποίησης, γίνεται πιο συχνή επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων. Παρά ταύτα, για να γίνουν τα παραπάνω είναι απαραίτητο να μειωθεί η σχετική παρεμβολή χωρίς να μειωθεί η ισχύς εκπομπής. Η ομοδιαυλική παρεμβολή μειώνεται καθώς στην περίπτωση των πανκατευθυντικών κεραιών, έξι γειτονικά κελιά παρεμβάλλονται, ενώ στην περίπτωση με τους sectors μόνο δύο. Το κόστος για την εφαρμογή της παραπάνω τεχνικής είναι ο πολλαπλασιασμός των κεραιοσυστημάτων ανά σταθμό βάσης.



Σχήμα 2.3 Τεχνική Cell Splitting

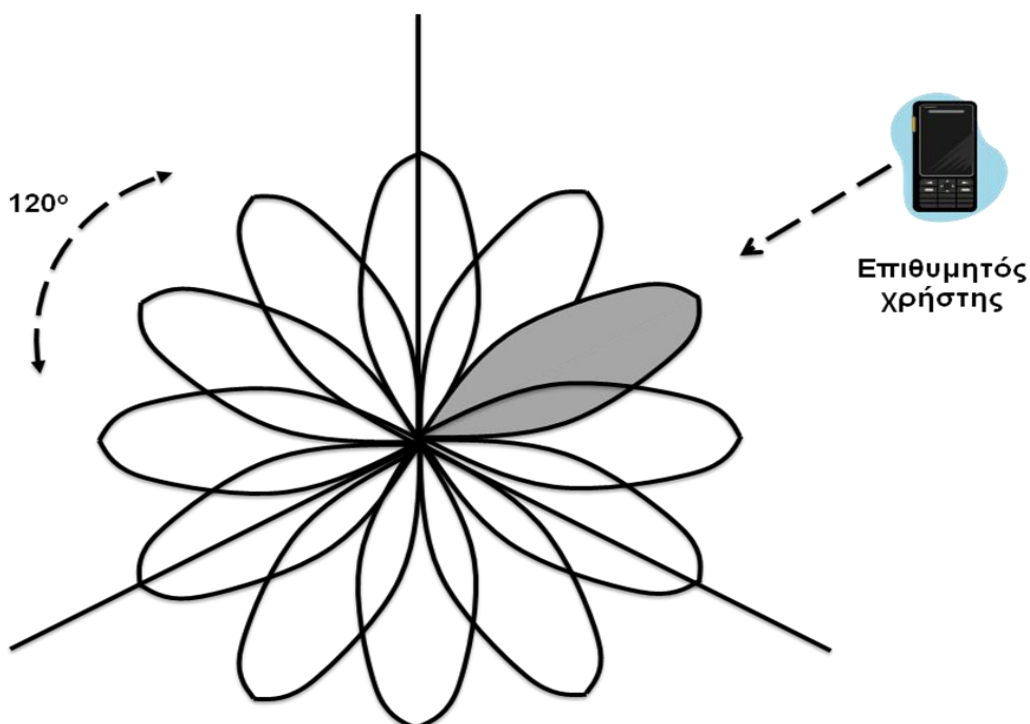


Σχήμα 2.4 Τυπική δομή σταθμών με 3 sectors

Τα ευφυή κεραιοσυστήματα αποτελούν ουσιαστικά μια εξέλιξη της τεχνικής cell sectoring καθώς κάθε sector αποτελείται πλέον από πολλαπλές δέσμες τις οποίες ελέγχει το κεραιοσύστημα (σχήμα 2.5). Ο τρόπος διαχωρισμού του συμβατικού sector σε προκαθορισμένες δέσμες είναι σε άμεση σχέση με τη γεωμετρία του κεραιοσυστήματος. Επειδή οι δέσμες είναι πολύ στενές, περιορίζονται μόνο επάνω στο χρήστη ενδιαφέροντος με αποτέλεσμα να μειώνουν την παρεμβολή προς τους υπόλοιπους χρήστες.

Στα TDMA συστήματα ο περιορισμός στη συνολική χωρητικότητα, προέρχεται από μικρό πλήθος σημάτων παρεμβολής. Μια κεραία επιλογής δέσμης, μειώνει την πιθανότητα ταυτόχρονης εμφάνισης του επιθυμητού σήματος και του σήματος παρεμβολής στην ενεργή δέσμη και επομένως αυξάνεται έμμεσα η χωρητικότητα αφού επιτρέπεται συχνότερη επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων. Τα προσαρμοστικά συστήματα μπορούν να απορρίψουν παρεμβολείς ακόμη και αν αποτελούνται από μικρό πλήθος στοιχείων. Ένα τέτοιο σύστημα  $M$ -στοιχείων, μπορεί να αυξήσει τη χωρητικότητα κατά  $M$  φορές ανεξαρτήτως της γωνιακής διασποράς. Από προσομοιώσεις που έχουν γίνει σε υπολογιστές, διαφαίνεται ότι ένα προσαρμοστικό σύστημα, τεσσάρων στοιχείων, επιτρέπει επαναχρησιμοποίηση

συχνότητας σε κάθε κυψέλη (σε σύστημα με τρεις κυψέλες) και αύξηση της χωρητικότητας κατά 7 φορές. Επιπλέον, ένα σύστημα επιλογής δέσμης με τέσσερα πιθανά διαγράμματα ακτινοβολίας, επιτρέπει ένα παράγοντα επαναχρησιμοποίησης συχνότητας ίσο με τρία ή τέσσερα και διπλασιασμό της συνολικής χωρητικότητας [2-3].



Σχήμα 2.5 Σύστημα επιλογής δέσμης

Στα συστήματα CDMA, η παρεχόμενη χωρητικότητα εξαρτάται άμεσα από τον παράγοντα εξάπλωσης (spreading factor) και από την παρουσία ομοδιαυλικών παρεμβολών με ίση ισχύ [2-3]. Ένα σύστημα επιλογής πολλαπλής δέσμης με  $M$  συνολικά δέσμες, μειώνει το πλήθος των παρεμβολών ανά δέσμη κατά ένα παράγοντα ίσο με  $M$ . Τα προσαρμοστικά συστήματα παρέχουν ελάχιστα καλύτερη επίδοση καθώς το πλήθος των παρεμβολών είναι μεγαλύτερο από το πλήθος των κεραιών. Επομένως, και δεδομένου ότι τα συστήματα επιλογής δέσμης είναι απλούστερα, προτιμούνται σε CDMA συστήματα.

Συνοψίζοντας γίνεται φανερό ότι ένα βασικό κίνητρο για την εφαρμογή των κεραιοσυστημάτων είναι η επαύξηση χωρητικότητας που μπορούν να προσφέρουν. Σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, τα κυψελωτά δίκτυα για κινητές τηλεπικοινωνίες περιορίζονται από τα παρεμβολικά σήματα που σημαίνει ότι παρεμβολές από άλλους

χρήστες είναι η κύρια πηγή θορύβου του συστήματος. Ο λόγος σήμα προς παρεμβολές (SIR) είναι πολύ μεγαλύτερος από το σηματοθορυβικό λόγο (SNR). Τα κεραιοσυστήματα αυξάνουν το SIR καθώς ενισχύουν το επωφελές σήμα λήψης και απορρίπτουν τα σήματα παρεμβολής.

- **Στα TDMA συστήματα, πλήρως προσαρμοστικές κεραιές  $M$  στοιχείων, μπορούν να αυξήσουν περισσότερο από  $M$  φορές την χωρητικότητα του συστήματος**
- **Στα CDMA συστήματα, κεραιές επιλογής δέσμης  $M$  στοιχείων, μπορούν να αυξήσουν  $M$  φορές περίπου τη χωρητικότητα του συστήματος.**

### 2.2.2 Αύξηση κάλυψης σταθμού βάσης

Τα ευφυή κεραιοσυστήματα όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, είναι πιο κατευθυντικά όταν συγκρίνονται με συμβατικούς sectors. Είναι φανερό ότι λόγω της κατευθυντικότητάς τους μπορούν να επικεντρώσουν την εκπεμπόμενη ενέργεια μόνο προς το χρήστη ενδιαφέροντος και όχι να την κατασπαταλούν προς τις υπόλοιπες κατευθύνσεις. Αυτό σημαίνει ότι οι σταθμοί βάσεις μπορούν να εγκατασταθούν σε μακρινότερες αποστάσεις μεταξύ τους οδηγώντας σε μια πιο ορθολογιστική και οικονομική ανάπτυξη του δικτύου.

Όταν η γωνιακή διασπορά είναι μικρή, τόσο μια προσαρμοστική κεραία με  $M$  συνολικά στοιχεία όσο και μια κεραία επιλογής λοβού με το ίδιο πλήθος στοιχείων, εμφανίζουν  $M$  φορές αυξημένο κέρδος. Το γεγονός αυτό αυξάνει την ακτίνα κάλυψης κατά ένα παράγοντα ίσο με  $M^{1/\gamma}$ , όπου  $\gamma$  ο συντελεστή απωλειών διάδοσης (τυπική τιμή  $\gamma=4$ ). Η αντίστοιχη μείωση στο πλήθος των απαραίτητων σταθμών βάσης για την κάλυψη της ίδιας περιοχής, εκφράζεται από ένα παράγοντα ίσο με  $M^{2/\gamma}$  [2-3].

Με τις προσαρμοστικές κεραιές, παρουσιάζεται και κέρδος λόγω διαφορεικής λήψης (diversity gain). Το κέρδος αυτό είναι μεγαλύτερο όταν η γωνιακή διασπορά έχει σχετικά υψηλή τιμή (η συσχέτιση των σημάτων που λαμβάνονται είναι μικρή) και επομένως το συνολικό κέρδος της κεραιάς αυξάνεται, οπότε και η ακτίνα κάλυψης. Οι κεραιές επιλογής λοβού δεν παρέχουν επιπλέον κέρδος λόγω διαφορεικής λήψης, όταν το εύρος της ενεργής δέσμης είναι μικρότερο από τη γωνιακή διασπορά, διότι σε αυτή την περίπτωση αποκλείονται λαμβανόμενα σήματα.



Από τα παραπάνω διαφαίνεται ότι τα προσαρμοστικά κεραιοσυστήματα παρουσιάζουν ελαφρά αυξημένο κέρδος σε σχέση με τα συστήματα επιλογής δέσμης. Εφόσον όμως τα συστήματα επιλογής έχουν απλούστερη αρχιτεκτονική δομή και μικρότερη πολυπλοκότητα, αποτελούν πιο ελκυστική λύση. Επίσης διαφαίνεται ότι λόγω της αυξημένης γεωγραφικής κάλυψης που παρέχουν, αποτελούν πολύ καλή λύση για υπαίθριες μη αστικές περιοχές όπου η κάλυψη είναι πιο κρίσιμη σε σχέση με την προσφερόμενη χωρητικότητα.

- **Στα TDMA συστήματα, πλήρως προσαρμοστικές κεραιές Μ στοιχείων, με μεγάλη απόσταση μεταξύ των στοιχείων, μπορούν να αυξήσουν περισσότερο από Μ φορές το συνολικό κέρδος. Παρόλα αυτά, για το downlink πρέπει να ακολουθηθεί η λογική των συστημάτων επιλογής δέσμης.**
- **Στα CDMA συστήματα, κεραιές επιλογής δέσμης Μ στοιχείων, μπορούν να αυξήσουν Μ φορές περίπου το συνολικό κέρδος.**

### 2.2.3 *Αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων*

Μέχρι πρόσφατα η έννοια της πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath) είχε συσχετιστεί άμεσα με την υποβάθμιση της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος. Οι τελευταίες μελέτες στον τομέα της θεωρίας πληροφοριών, δείχνουν ότι η ταυτόχρονη χρήση ευφών κεραιοσυστημάτων τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη, είναι δυνατόν να αυξήσουν τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων με εκμετάλλευση του φαινομένου της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Ουσιαστικά είναι δυνατόν να δημιουργηθούν παράλληλα χωρικά κανάλια που θα λειτουργούν ταυτόχρονα και στην ίδια συχνότητα (MIMO Multiple input Multiple output channels) [13-14]. Στην παραπάνω ιδέα είναι βασισμένες οι αρχιτεκτονικές συστημάτων χωροχρόνου (space-time systems) με την προτεινόμενη ονομασία BLAST. Σε αυτά τα συστήματα, εκπέμπονται ταυτόχρονα και από διαφορετικές κεραιές του κεραιοσυστήματος, ακολουθίες δεδομένων. Με την παρουσία πολλαπλών διαδρομών και δεδομένου ότι ο δέκτης είναι εξοπλισμένος με ευφές κεραιοσύστημα αντίστοιχο του πομπού, είναι δυνατόν οι ακολουθίες δεδομένων να αποκωδικοποιηθούν.

Ένα σημαντικό σημείο το οποίο αξίζει να σημειωθεί είναι ότι με τη συγκεκριμένη τεχνική, η συνολική εκπεμπόμενη ενέργεια παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως του πλήθους των κεραιών από τις οποίες αποτελείται το κεραιοσύστημα

Επομένως, εξαιρετική διαχείριση του φάσματος μπορεί να γίνει καθώς το επίπεδο παρεμβολής δεν αυξάνεται. Υπό αυτή την έννοια ο αλγόριθμος BLAST μπορεί να θεωρηθεί μια εξέλιξη του SDMA όπου πολλαπλοί χρήστες περιλαμβάνονται σε ένα τερματικό BLAST που μπορεί να επεξεργαστεί ταυτόχρονα τα παράλληλα λαμβανόμενα σήματα.

Με μια κεραία  $M$  στοιχείων και επομένως  $M$  πομποδεκτών, δημιουργούνται  $M$  διαφορετικά κανάλια επικοινωνίας. Ο ρυθμός μετάδοσης θεωρητικά θα πρέπει να είναι  $M$  φορές επαυξημένος σε σχέση με τις κλασικές περιπτώσεις. Για παράδειγμα, ως θεωρηθεί το IS-136 σύστημα με 48,6 Kbps σε φάσμα 30 KHz. Χρησιμοποιώντας κεραίες  $M$  στοιχείων και επομένως δημιουργώντας  $M$  διαφορετικά χωρικά κανάλια, είναι δυνατόν να επιτευχθεί ρυθμός μετάδοσης  $M*48,6$  Kbps χρησιμοποιώντας το ίδιο φάσμα των 30KHz. Τεχνικές όπως space time κωδικοποίηση και layered space time επεξεργασίας, μπορούν να προσφέρουν στο χρήστη πολλαπλάσια bps/Hertz [2-3].

#### 2.2.4 Αύξηση ασφάλειας

Ένα ακόμη πλεονέκτημα που παρουσιάζουν τα ευφυή κεραιοσυστήματα είναι η αυξημένη ασφάλεια στη μετάδοση δεδομένων. Σε ένα περιβάλλον όπου το πληροφοριακό περιεχόμενο έχει εξαιρετικά μεγάλη σημασία, η ασφάλεια των δεδομένων είναι κρίσιμο σημείο. Με τις ευφυείς κεραίες, γίνεται δύσκολη η υποκλοπή στοιχείων καθώς ο υποκλοπέας πρέπει να είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένος στην κατεύθυνση πομπού-δέκτη.

Συνοψίζοντας, όλα τα παραπάνω διαφαίνεται ότι ο κυριότερος λόγος ανάπτυξης των ευφών κεραιοσυστημάτων, είναι η αύξηση της χωρητικότητας. Σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, περιορίζονται από την παρουσία σημάτων παρεμβολής. Τα ευφυή κεραιοσυστήματα ουσιαστικά αυξάνουν το λόγο σήματος-παρεμβολής SIR, ενισχύοντας τη λήψη του σήματος ενδιαφέροντος και μειώνοντας το επίπεδο των σημάτων παρεμβολής. Το δεύτερο σημαντικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν είναι η αυξημένη ακτίνα κάλυψης. Τα ευφυή κεραιοσυστήματα είναι πιο κατευθυντικά σε σχέση με τις συμβατικές ομοιοκατευθυντικές ή τμηματοποιημένες κεραίες. Ουσιαστικά η ενέργεια που εκπέμπεται προς τους χρήστες, είναι επικεντρωμένη προς την κατεύθυνση των

χρηστών ενδιαφέροντας και μόνο, χωρίς να κατασπαταλάται και προς άλλες κατευθύνσεις όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των ομοιοκατευθυντικών κεραιών. Συνεπώς, οι σταθμοί βάσεις με τα ευφυή κεραιοσυστήματα, μπορούν να είναι εγκατεστημένοι σε μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους, μια προοπτική με πολλαπλό οικονομικό κέρδος. Τέλος, σημαντικά είναι τα οφέλη από την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί.

### **2.3 Εφαρμογές ευφών κεραιοσυστημάτων – αποτελέσματα πιλοτικών εφαρμογών**

Μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακό χώρο, με ευφυή κεραιοσυστήματα, απέδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί βελτίωση του λόγου CIR κατά 30 dB όταν το επιθυμητό σήμα είναι ασθενές και υπάρχει παρουσία ισχυρού παρεμβολέα [15]. Στην περίπτωση που η γωνία άφιξης των δύο σημάτων (ωφέλιμου και παρεμβολικού) μειώνεται, η βελτίωση του CIR μειώνεται επίσης. Υπολογίστηκε ότι για CIR=-20dB η ελάχιστη διαφορά της γωνίας άφιξης των δυο σημάτων για επικοινωνία χωρίς λάθη, πρέπει να είναι 10°.

Στις ακόλουθες παραγράφους γίνεται μια σύντομη περιγραφή των αποτελεσμάτων από τα πιλοτικά έργα που διεξήχθησαν στα πλαίσια της εφαρμογής των ευφών κεραιοσυστημάτων σε δίκτυα GSM [16-23].

#### *2.3.1 Αποτελέσματα πιλοτικής εφαρμογής του συστήματος της Metawave® Communications*

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις πιλοτικές εφαρμογές σε δίκτυα GSM στην Σαγκάη, στην πόλη Guangdong και στην πόλη Guangzhou.

##### 2.3.1.1 Αποτελέσματα από το δίκτυο στην πόλη της Σαγκάης

Η εταιρία επικοινωνιών Metawave® Communications, προμηθευτής ευφών συστημάτων κεραιών, πραγματοποίησε πιλοτική δοκιμή ευφών συστημάτων κεραιών για δίκτυα GSM στον αστικό πυρήνα της Σαγκάης, στην Κίνα. Η εταιρία τηλεπικοινωνιών China Unicom, ένας κορυφαίος πάροχος υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας στην Κίνα, ολοκλήρωσε μια σημαντική υπαίθρια δοκιμή του έξυπνου

συστήματος κεραιών GSM SpotLight® Metawave, εξετάζοντας τη διασύνδεση, τη λειτουργία, και την ικανότητα μείωσης παρεμβολών που προσφέρει, όταν αυτό εγκαταστάθηκε στο δίκτυο GSM.

Η εμπορική δοκιμή άρχισε τον Οκτώβριο του 2000 και παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση στην ποιότητα του σήματος και μεγαλύτερη από 50% μείωση στις διακοπόμενες κλήσεις. Ως αποτέλεσμα της επιτυχούς ολοκλήρωσης της δοκιμής, η Metawave θα συνεχίσει να συνεργάζεται με την China Unicom για να βελτιώσει το δίκτυο και να παραδίδονται ποιοτικά καλύτερες υπηρεσίες στους πελάτες. "Η Κίνα αντιπροσωπεύει τη γρηγορότερα αυξανόμενη αγορά GSM στον κόσμο, και η επιτυχία αυτής της δοκιμής κατέδειξε ότι τα ευφυή συστήματα κεραιών, μπορούν να βοηθήσουν τους παρόχους στην Κίνα αλλά και σε όλο τον κόσμο, στην αύξηση της ποιότητας αποτελεσματικά και οικονομικά," λέει ο Bob Hunsberger, CEO της Metawave.

Το GSM SpotLight της Metawave είναι ένα σύστημα που μπορεί να προσαρμοστεί σε οποιοδήποτε σταθμό βάσης GSM. Το SpotLight συνδέεται στις πόρτες εκπομπής και λήψης του σταθμού βάσης μέσω απλών συνδέσεων με RF καλώδια.

Τα ευφυή συστήματα κεραιών παρέχουν στις εταιρίες τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, μια ισχυρή και οικονομικώς αποδοτική μέθοδο για την αύξηση της χωρητικότητας και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου. Με βάση την ανάλυση από τη Metawave και τα εμπειρικά αποτελέσματα των δοκιμών, η Metawave υπολογίζει ότι η εγκατάσταση του GSM SpotLight στο 40% των κυψελών, σε ένα πυκνό αστικό δίκτυο, θα μπορούσε να διπλασιάσει την χωρητικότητα του δικτύου. Με τη μείωση των παρεμβολών, το GSM SpotLight ενισχύει επίσης το ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας με GPRS.

Η China United Communications Corporation Limited, είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος, σε εθνικό επίπεδο, πάροχος επικοινωνιών στην Κίνα και διαμορφώθηκε στις 19 Ιουλίου, το 1994. Η καθιέρωση της China Unicom έχει διαδραματίσει έναν θετικό ρόλο στην εισαγωγή του ανταγωνισμού στον τομέα των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, στη μεταρρύθμιση και την ανάπτυξη της βιομηχανίας τηλεπικοινωνιών στην Κίνα. Η China Unicom είναι μια εταιρία περιορισμένης ευθύνης και αυτή την περίοδο έχει περίπου 300 περιφερειακά γραφεία και 11 υποκαταστήματα σε 30 επαρχίες. Στις 21 και 22 Ιουνίου 2000, η China Unicom εισήχθη στα χρηματιστήρια

της Νέας Υόρκης και του Χονγκ Κονγκ. Για περισσότερες πληροφορίες : [www.chinaunicom.net](http://www.chinaunicom.net).

### 2.3.1.2 Αποτελέσματα από το δίκτυο στην πόλη της Guangdong

Η εταιρία επικοινωνιών Metawave® Communications, ολοκλήρωσε επιτυχώς πιλοτική δοκιμή ευφών συστημάτων κεραιών για δίκτυα GSM σε τμήμα του δικτύου της πόλης Guangdong. Το παραπάνω δίκτυο είναι από τα μεγαλύτερα στην Κίνα με περισσότερους από 11 εκατομμύρια συνδρομητές. Η εταιρία Guangdong Mobile η οποία είναι θυγατρική της China Mobile (Χονγκ Κονγκ), του κορυφαίου παροχέα υπηρεσιών κινητής τηλεπικοινωνίας με περίπου 55 εκατομμύρια συνδρομητές, ολοκλήρωσε μια σημαντική υπαίθρια δοκιμή του έξυπνου συστήματος κεραιών GSM SpotLight® Metawave, εξετάζοντας τη διασύνδεση, τη λειτουργία, και την ικανότητα μείωσης παρεμβολών που προσφέρει, όταν αυτό εγκαταστάθηκε στο δίκτυο GSM.

Η εμπορική δοκιμή που πραγματοποιήθηκε σε δύο σταθμούς βάσης, στον αστικό πυρήνα της Guangdong άρχισε τον Νοέμβριο του 2000 και τελείωσε τον Μάρτιο του 2001, οδήγησε σε μια μείωση 39% στις διακοπόμενες κλήσεις. Με το GSM SpotLight, η γενική ποιότητα του σήματος βελτιώθηκε κατά 30% ως αποτέλεσμα επιπλέον απόρριψης uplink παρεμβολής μέχρι και 8,1 dB. Στο downlink η επιπλέον απόρριψη παρεμβολής μετρήθηκε και βρέθηκε να είναι 6 dB βελτιωμένη σε σχέση με τις τιμές στην απλή συμβατική κυψέλη. Αυτές οι βελτιώσεις στην ποιότητα, παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια μιας περιόδου αυξανόμενης κίνησης συνδρομητών. Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές, κατέδειξαν μείωση στο επίπεδο παρεμβολής των σημάτων. Εκτιμάται ότι με εγκατάσταση του συστήματος Spotlight στο 40% των κυψελών, σε ένα πυκνό αστικό δίκτυο, θα μπορούσε να διπλασιάσει την χωρητικότητα του δικτύου.

Η Guangdong Mobile Communications Company (GMCC) είναι ένας από τους μεγάλους παροχείς υπηρεσιών GSM στην Κίνα, καλύπτοντας όλες τις πόλεις στην επαρχία Guangdong. Από την έναρξη της εμπορικής λειτουργίας το 1987, η GMCC έχει υπερβεί τα 11 εκατομμύρια συνδρομητές και προσφέρει περιαγωγή σε πάνω από 50 χώρες. Η GMCC ταξινομείται μεταξύ των κορυφαίων 10 εταιριών κινητής τηλεφωνίας στον κόσμο. Η επιχείρηση είναι θυγατρική της εταιρίας China Mobile Communications Corporation, η οποία διαπραγματεύεται στα χρηματιστήρια

αξιών της Νέας Υόρκης και του Χονγκ Κονγκ. Για περισσότερες πληροφορίες : [www.gmcc.net](http://www.gmcc.net).

### 2.3.1.3 Αποτελέσματα από το δίκτυο στην πόλη της Guangzhou

Η εταιρία επικοινωνιών Metawave® Communications ολοκλήρωσε με επιτυχία πιλοτική δοκιμή ευφών συστημάτων κεραιών για δίκτυα GSM στην πόλη Guangzhou. Το δίκτυο της πόλης αυτής αποτελεί τμήμα του δικτύου της China Mobile, με πάνω από 5 εκατομμύρια συνδρομητές. Η εταιρία τηλεπικοινωνιών China Unicom, ένας κορυφαίος πάροχος υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας στην Κίνα, ολοκλήρωσε μια σημαντική υπαίθρια δοκιμή του έξυπνου συστήματος κεραιών GSM SpotLight® Metawave, εξετάζοντας τη διασύνδεση, τη λειτουργία, και την ικανότητα μείωσης παρεμβολών που προσφέρει, όταν αυτό εγκαταστάθηκε στο δίκτυο GSM. Επίσης ελέγχθηκε η ικανότητα εξυπηρέτησης περισσότερων χρηστών από την ίδια κυψέλη.

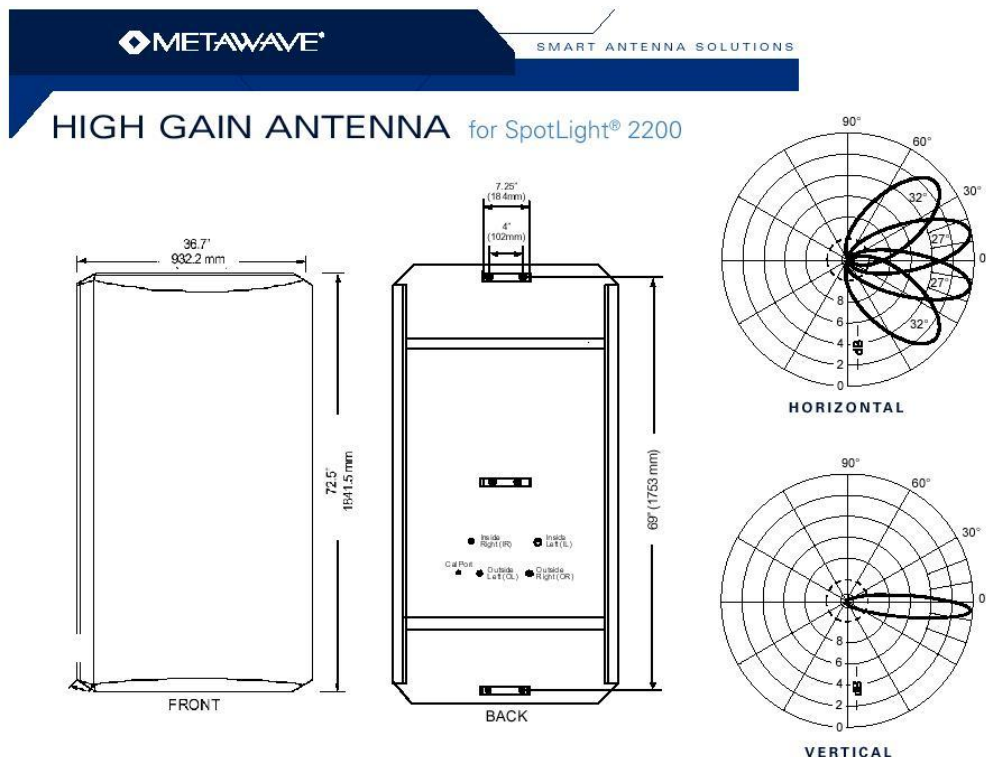
Τον Σεπτέμβριο του 2001, τα συστήματα GSM SpotLight εγκαταστάθηκαν σε δύο κυψέλες ενός σταθμού μιας περιοχής και σε μία κυψέλη ενός σταθμού μιας δεύτερης περιοχής, στον αστικό πυρήνα του δικτύου της Guangzhou. Με την εγκατάσταση του συστήματος SpotLight στο δίκτυο της Guangzhou Unicom, μειώθηκε ο ρυθμός Drop Call Rate κατά 35% σε ώρα αιχμής (busy hour), αναδεικνύοντας τη σημαντική βελτίωση στην ποιοτική συμπεριφορά του δικτύου. Αυτή η βελτίωση επιτεύχθηκε παρά τη σημαντική αύξηση στην κίνηση του δικτύου σε ώρα αιχμής που αγγίζει το 45% σε σχέση με τη μέση ημερήσια κίνηση. Εκτός από τα παραπάνω οφέλη που διαπιστώθηκαν, με το GSM SpotLight μειώθηκε κατά 40% ο ρυθμός διακοπόμενων κλήσεων (Drop Call Rate) στις παρακείμενες περιοχές των πιλοτικών σταθμών βάσης, ενώ παράλληλα το συνολικό φορτίο κίνησης του δικτύου παρέμενε σταθερό.

"Η αύξηση των απαιτήσεων σε ασύρματες υπηρεσίες είναι εκρηκτική στην αγορά της Κίνας και χρειαζόμαστε τις οικονομικώς αποδοτικές λύσεις για να μας βοηθήσουμε να υπερβούμε τις δυσκολίες που ανακύπτουν " δήλωσε ο Jun Dong, Διευθυντής Λειτουργίας και Συντήρησης του δικτύου της Guangdong, κλάδου της China Unicom Corporation Limited. "Τα ευφών κεραιοσυστήματα της Metawave, θα επιτρέψουν σε μας να επιτύχουμε αυτούς τους στόχους και να βελτιώσουμε σημαντικά την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών".

"Τα συστήματα αυτά είναι ιδανικές λύσεις για παροχές όπως η Guangzhou Unicom, που αντιμετωπίζουν τις προκλήσεις από ισχυρές παρεμβολές στο πυκνό αστικό δίκτυο GSM," δήλωσε ο Victor Liang, Πρόεδρος της Metawave. "Το GSM SpotLight βοηθά τους παρόχους να προστατεύσουν τις επενδύσεις που έχουν πραγματοποιήσει σε υποδομές, επειδή παρέχει λύσεις για την συνεχώς αυξανόμενη χωρητικότητα του δικτύου ενώ ταυτόχρονα αναδεικνύει νέες προκλήσεις σχετικά με τη βελτιστοποίηση του δικτύου."

Η China Unicom ιδρύθηκε το 1994 και είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος παροχέας τηλεπικοινωνιών στην Κίνα. Είναι ο μόνος φορέας παροχής υπηρεσιών στον οποίο έχει χορηγηθεί άδεια στην Κίνα για να προσφέρει πλήρης υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών σε σταθερά δίκτυα, IP τηλεφωνία, ασύρματα δίκτυα και δίκτυα δεδομένων. Στις 21 Ιουνίου 2000, η επιχείρηση αύξησε κατά 6.3 δισεκατομμύρια \$ το κεφάλαιο της, μέσω μιας προσφοράς IPO και έγινε η μεγαλύτερη δημόσια εμπορική επιχείρηση εκτός Ιαπωνίας, στην Ασία.

Το κεραιόσυστημα Spotlight που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των πιλοτικών δοκιμών φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6 Σύστημα Metawave Spotlight 2200 [24]

### 2.3.2 Αποτελέσματα από μελέτες και εφαρμογές της εταιρείας Symena

Η εταιρία Symena μετά από μελέτη της ραδιοκάλυψης στην πόλη της Βιέννης κατέληξε στο παρακάτω σενάριο. Θεωρήθηκε ότι όλη η πόλη καλύπτεται από 144 συμβατικές κυψέλες σε προκαθορισμένες θέσεις. Προκειμένου να αξιολογηθεί ο βαθμός βελτίωσης που επιφέρει η εγκατάσταση των ευφών κεραιοσυστημάτων, επιλέχθηκε να μετρηθεί ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης στη μονάδα του χρόνου από κάθε κυψέλη. Το μέγεθος αυτό εκφράζεται σε kbits/sec/cell.

Στην υφιστάμενη αρχική κατάσταση με τις 144 συμβατικές κυψέλες, ο ρυθμός μετάδοσης υπολογίστηκε στα 920 kbit/sec/cell. Υποθέτοντας ότι στο 50% των κυψελών εφαρμόζονται ευφυή κεραιοσυστήματα τότε ο ρυθμός υπολογίζεται σε 1610

kbit/sec/cell, αύξηση δηλαδή κατά 75%. Εάν επιπλέον γίνει βελτιστοποίηση στην τοποθέτηση των ευφών κεραιοσυστημάτων και επιλεγούν οι κατάλληλες θέσεις, τότε ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται κατά 36% επιπλέον και φτάνει τα 2193 kbit/sec/cell. Όλα αυτά φαίνονται και στον συγκεντρωτικό πίνακα 2.1.

Ένας δεύτερος τρόπος αξιολόγησης των εν λόγω κεραιοσυστημάτων, είναι η κάλυψη. Για τη διατήρηση της υφιστάμενης κάλυψης στην πόλη της Βιέννης απαιτούνται 144 κυψέλες.

	kbit/cell/sec	Επαύξηση χωρητικότητας
Κεραία Sector (144 sectors)	920	Βασική τιμή
Τυχαία κατανομή ευφών κεραιοσυστημάτων σε 72 sectors	1610	+75% (από το προηγούμενο σενάριο)
Βελτιστοποιημένη κατανομή ευφών κεραιοσυστημάτων σε 72 sectors	2193	+36% (από το προηγούμενο σενάριο)

Πίνακας 2.1 Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ανά κυψέλη στη μονάδα του χρόνου

	Απαιτούμενα cells	Μείωση
Κεραία Sector	144	Βασική τιμή
Τυχαία κατανομή ευφών κεραιοσυστημάτων	80	-44% (από προηγούμενο σενάριο)
Βελτιστοποιημένη κατανομή ευφών κεραιοσυστημάτων	69	-14% (από προηγούμενο σενάριο)

Πίνακας 2.2 Απαιτούμενο πλήθος κυψελών για σταθερή κάλυψη



Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 2.2 εάν εγκατασταθούν σε 80 τυχαίες κυψέλες ευφυή κεραιοσυστήματα, τότε επιτυγχάνεται η ίδια κάλυψη. Απαιτούνται δηλαδή 64 λιγότερες κυψέλες, μείωση της τάξης του 44%. Στην περίπτωση που γίνει βελτιστοποίηση στη χωροθέτηση των κυψελών και επιλεγούν οι κατάλληλες θέσεις, τότε η κάλυψη επιτυγχάνεται με συνολικά 69 κυψέλες και η μείωση αγγίζει το 58% συνολικά σε σχέση με την αρχική κατάσταση.

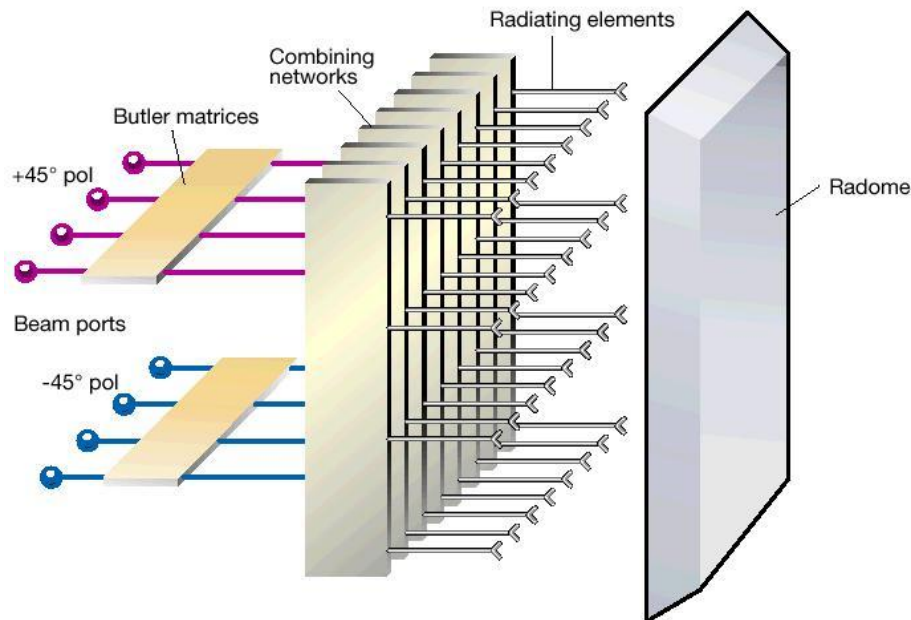
### 2.3.3 Αποτελέσματα από συστήματα της Ericsson στα δίκτυα Mannesmann και D2 GSM

Τα ευφυή συστήματα κεραιών αντιπροσωπεύουν μια περιοχή στην οποία γίνονται ιδιαίτερες προσπάθειες ανάπτυξης. Οι υπαίθριες δοκιμές και τα πιλοτικά έργα πραγματοποιούνται με στόχο την αύξηση της χωρητικότητας στα δίκτυα κινητής επικοινωνίας. Η Ericsson έχει αναπτύξει μια σειρά από κεραιοσυστήματα για χρήση στις ζώνες συχνοτήτων των 900 MHz, 1800 MHz και 1900 MHz. Χάρη στις μικροταινίες, πίνακες Buttler και διπλής πολικότητας δέσμες, αυτά τα κεραιοσυστήματα έχουν υψηλό κέρδος και άριστη χωρική απόδοση. Η Ericsson έχει αναπτύξει δυδιάστατες σειρές κεραιών για τα ευφυή συστήματα κεραιών που αναπτύσσονται σε σταθμούς βάσης και είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να υποστηρίζονται τα πρότυπα GSM και TDMA (IS-136). Μαζί με Mannesmann Mobilfunk GmbH (GSM) και την AT&T (TDMA), η Ericsson έχει πραγματοποιήσει υπαίθριες δοκιμές σε ενεργά δίκτυα για να αξιολογήσει την απόδοση των προσαρμοστικών συστημάτων.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα προσαρμοστικά συστήματα κεραιών αυξάνουν αρκετά την χωρητικότητα. Το ευφύες κεραιοσύστημα εκπέμπει και λαμβάνει τα σήματα ραδιοσυχνότητας από και προς όλες τις δυνατές κατευθύνσεις με στενές δέσμες. Στο σχήμα 2.7 σχήμα φαίνεται η αρχιτεκτονική ενός από τα συστήματα πολλαπλών δεσμών.

Εκτός από την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, τα συστήματα αυτά αυξάνουν και την κάλυψη μιας και χρησιμοποιούνται στενές κατευθυντικές δέσμες. Το κέρδος του κεραιοσυστήματος της Ericsson για το GSM 900 MHz, το οποίο φαίνεται στο σχήμα 2.8 μαζί με τον αντίστοιχο σταθμό βάσης, σε σύγκριση με αυτό μιας συμβατικής κεραίας τομέα, είναι περισσότερο από δύο φορές πιο υψηλό. Επίσης

στο σχήμα 2.9 φαίνεται το διάγραμμα ακτινοβολίας για μια πόλωση και τέλος το συνολικό διάγραμμα ακτινοβολίας και για τις δύο πολώσεις.



Σχήμα 2.7 Αρχιτεκτονική ευφυούς κεραιοσυστήματος Ericsson [25]

Οι πιλοτικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο GSM δίκτυο της D2. Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ραδιοκαμπίνα της Ericsson RBS 2205 με το παθητικό κεραιοσύστημα των οκτώ δεσμών. Στόχος των μετρήσεων ήταν η αξιολόγηση των ευφών κεραιοσυστημάτων σε διάφορα περιβάλλοντα διάδοσης (αστικό, ημιαστικό, επαρχιακό κλπ). Το κυριότερο συμπέρασμα μετά το τέλος των μετρήσεων ήταν ότι με τα ευφή κεραιοσυστήματα είναι δυνατή μια πιο σφιχτή επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων.

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο ο λόγος C/I όταν χρησιμοποιούνται τα ευφή κεραιοσυστήματα, είναι πολύ βελτιωμένος και επιτρέπεται έτσι πιο συχνή επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων. Στο δίκτυο όπου έγιναν οι μετρήσεις εκτιμήθηκε ότι η μέση επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων είναι δυνατόν να μειωθεί από 4 έως 9 φορές. Τέλος η αύξηση της χωρητικότητας υπολογίστηκε σε 100% έως 120% με λόγο C/I ίσο προς 5-6 dB.

## GSM Capacity Booster, RBS 2205

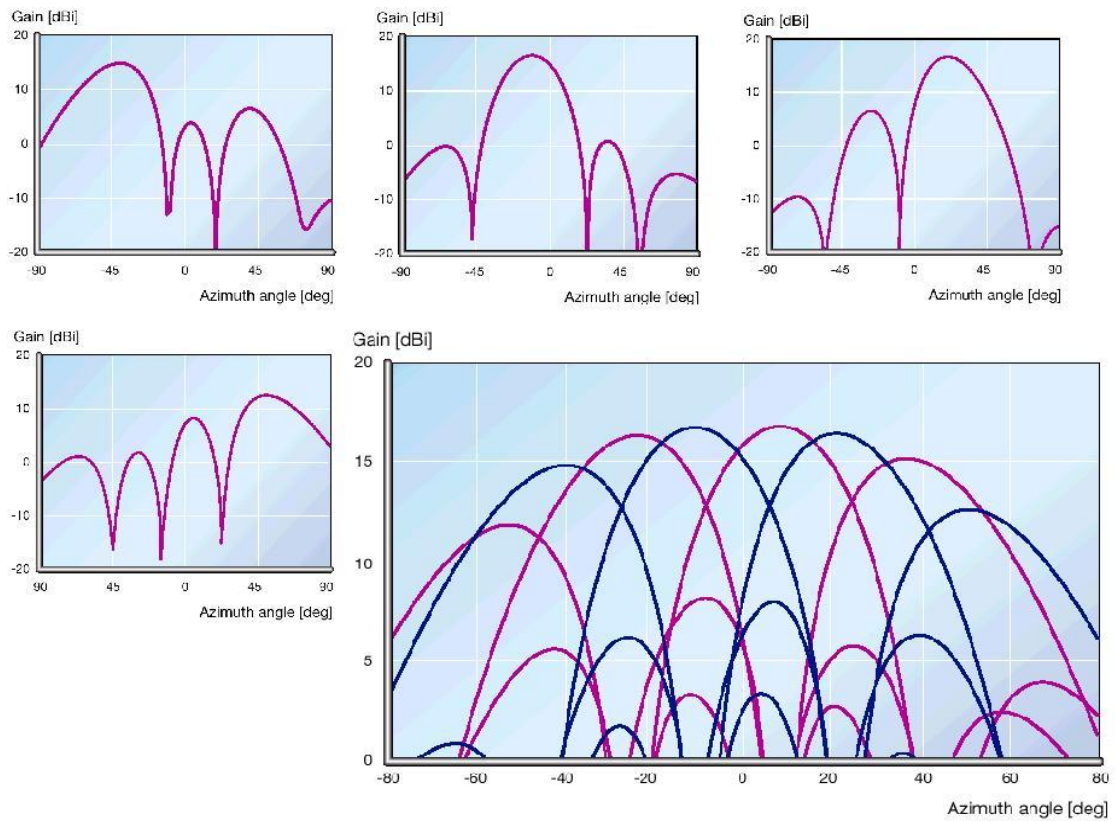


Radio base-station



8-beam array antenna

Σχήμα 2.8 Ραδιοκαμπίνα και κεραιοσύστημα Ericsson που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων [25]



Σχήμα 2.9 Διαγράμματα ακτινοβολίας του συστήματος της Ericsson [25]

#### 2.3.4 Εφαρμογή συστήματος ArrayComm (Intellicell) στο δίκτυο AirNet Communications Corp (Broadband Super Capacity AdaptaCell GSM BTS)

Η εταιρία επικοινωνιών AirNet ολοκλήρωσε με επιτυχία πιλοτική δοκιμή της ραδιοκαμπίνας SuperCapacity AdaptaCell χρησιμοποιώντας το προσαρμοζόμενο κεραιοσύστημα της ArrayComm, IntelliCell. Περισσότεροι από 10 πιθανοί πελάτες-πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών και εμπειρογνώμονες στο τομέα των τηλεπικοινωνιών από όλο τον κόσμο, συμμετείχαν στις δοκιμές του νέου συστήματος που πραγματοποιήθηκαν το Δεκέμβριο 2002 και Ιανουάριο 2003.

Οι προσκεκλημένοι εξέτασαν την κίνηση του δικτύου GSM ενώ σε αυτό είχαν εγκατασταθεί, σε πολλαπλούς σταθμούς βάσης, τα νέα συστήματα της AirNet, SuperCapacity AdaptaCell . Σκοπός των δοκιμών ήταν η επίδειξη της συμπεριφοράς ενός δικτύου πολλαπλών, γειτονικών, προσαρμοζόμενων macro-κυψελών, με παρουσία πολλαπλών co-channel παρεμβολών. Παράλληλα, η AirNet θέλησε να αποδείξει ότι ένα σχέδιο επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων με  $N=1$ , χωρίς απαίτηση για frequency hopping σε συνδυασμό με το παραπάνω νέο σύστημα, είναι όχι μόνο βιώσιμο αλλά και άκρως ωφέλιμο για τους παρόχους. Αυτή η επαναχρησιμοποίηση με  $N=1$  παρέχει τεράστια οικονομικά κέρδη στους χειριστές δικτύων GSM που θέλουν να μεγιστοποιήσουν τις επενδύσεις τους και να εξοικονομήσουν φάσμα ραδιοσυχνοτήτων.

Σαν άμεσο αποτέλεσμα αυτών των δοκιμών, η AirNet ανήγγειλε ότι ένας σημαντικός πάροχος έχει υπογράψει μια συμφωνία για υπαίθριες δοκιμές, με σκοπό να επεκτείνει και να εγκαταστήσει το σταθμό βάσης SuperCapacity σε ένα εμπορικό δίκτυο. Το αναφερόμενο σύστημα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.10.

"Ο σταθμός βάσης της AirNet της σειράς SuperCapacity, είναι η σημαντικότερη πρόταση της AirNet, με τεράστια στρατηγική σπουδαιότητα" δήλωσε ο Glenn Ehley, πρόεδρος και CEO της AirNet. "Αυτή η τεχνολογία βελτιώνει εντυπωσιακά τη χωρητικότητα, την ποιότητα των κλήσεων, και την απόδοση μεταφοράς δεδομένων σε υψηλή ταχύτητα, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται ο αριθμός των απαιτούμενων κυψελών για κάλυψη. Το ευρέως χρησιμοποιούμενο κυψελοειδές πρότυπο GSM, μπορεί να πραγματοποιήσει εντυπωσιακά άλματα χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνολογία."



Σχήμα 2.10 AirNet Super Capacity AdaptaCell GSM BTS & ArrayCom IntelliCell [26]

"Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει μια ελεύθερη κατανομή φάσματος, έξι φορές μεγαλύτερη από την υπάρχουσα κατανομή και φυσικά θα επιφέρει τεράστια θετική επίδραση στην οικονομική κατάσταση των εταιριών παροχής ασύρματων υπηρεσιών τηλεπικοινωνίας" δήλωσε ο Sam Endy, υψηλόβαθμος προϊστάμενος της ArrayComm. "Ο συνδυασμός της τεχνολογίας του AdaptaCell και του IntelliCell ικανοποιεί τις αυξανόμενες απαιτήσεις χωρητικότητας, κάλυψης και απόδοσης που απαιτούνται επειγόντως από τους χειριστές GSM δικτύων".

Στα πλαίσια των δοκιμών πραγματοποιήθηκε κλήση μεταξύ χρηστών οι οποίοι εξυπηρετούνταν από γειτονικούς σταθμούς. Οι σταθμοί είχαν την ίδια συχνότητα και οι χρήστες χρησιμοποιούσαν το ίδιο ακριβώς timeslot (πχ timeslot no 6). Οι χρήστες καθώς πλησίαζαν μεταξύ τους δεν αντιλήφθηκαν καμία αλλοίωση στην ποιότητα της κλήσης. Ακόμη και όταν πέρασαν ο ένας δίπλα στον άλλο με τα αυτοκίνητά τους, δεν παρουσιάστηκε καμία δυσλειτουργία.

"Προκειμένου να υποστηριχθούν οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις σε χωρητικότητα, οι πάροχοι πρέπει να επαναχρησιμοποιήσουν το φάσμα τους. Αυτή η επαναχρησιμοποίηση του φάσματος δημιουργεί τα πρόσθετα κανάλια φωνής αλλά

παράλληλα αυξάνει τις παρεμβολές, που υποβιβάζουν την ποιότητα της υπηρεσίας που παρέχεται από το δίκτυο" δήλωσε ο Thomas P. Schmutz, αντιπρόεδρος της AirNet. "Αντίθετα, ο σταθμός βάσης SuperCapacity που χρησιμοποιεί την τεχνολογία της ArrayComm μειώνει τις εμφανιζόμενες παρεμβολές και βελτιώνει την ποιότητα της φωνής".

Η AirNet ανήγγειλε επίσης σήμερα ότι θα παρουσιάσει τις ικανότητες του σταθμού βάσης SuperCapacity στο συνέδριο 3GSM Congress03, στις Κάννες της Γαλλίας, στις 18 Φεβρουαρίου μέχρι τις 21 Φεβρουαρίου 2003.

## 2.4 Βιβλιογραφία

- 1 S. Belofiore, C. A. Balanis, J. Foutz, A. S. Spanias, "Smart antenna systems for mobile communication networks, Part 1 : Overview and antenna design", *IEEE Antenna's and Propagation Magazine*, pp 145-154, vol 44, no 3, June 2002
- 2 T.S. Rappaport, *Wireless Communications*, Upper Saddle River, Prentice Hall, 1996
- 3 N. Blaunstein, J. Bach Andersen, *Multipath phenomena in cellular networks*, Artech House Publishers, 2002
- 4 N. Blaunstein, C. G. Christodoulou, *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links*, John Wiley, 2007
- 5 J. H. Winters, "Smart antennas for wireless systems", *IEEE Personal Communications*, pp 23-27, February 1998
- 6 J. H. Winters, "Smart antennas for wireless systems", Technical Report
- 7 B. Sklar, "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part I : Characterization", *IEEE Communications Magazine*, pp. 90-100, July 1997
- 8 B. Sklar, "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part II : Mitigation", *IEEE Communications Magazine*, pp. 148-155, September 1997
- 9 S. Redl, M. Oliphant, M. Weber, *An Introduction to GSM*, Artech House, 1995
- 10 V. Garg, J. Wilkes, *Principles and Applications of GSM*, Prentice Hall Professional Published, 1998
- 11 J. Tisal, *The GSM Network*, John Wiley & Sons, 2001

- 12 S. Redl, M. Weber, M. Oliphant, *GSM and Personal Communications Handbook*, Artech House, 1998
- 13 A. Lozano, F. R. Farrokhi, R. A. Valenzuela, "Lifting the limits on high-speed wireless data access using antenna arrays", *IEEE Communications Magazine*, pp 156-162, September 2001
- 14 G. F. Foschini, M. J. L. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas", *Wireless Personal Communications*, Kluwer Academic Publishers, no. 6, pp. 311-335, 1998
- 15 J. Strandell, M. Wennstrom, A. Rydberg, T. Oberg, O. Gladh, L. Rexberg, E. Sandberg, B. V. Andersson and M. Appelgren, "Experimental Evaluation of an Adaptive Antenna for a TDMA Mobile Telephony System", Technical Report
- 16 A. O. Boukalov, S. Haggman, "System aspects of smart-antenna technology in cellular wireless communications-an overview", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.48, no. 6, June 2000
- 17 A. Derneryd, B. Johannisson, "Smart Antennas for GSM and TDMA Networks", R&D report
- 18 S. Anderson, B. Hagerman, H. Dam, U. Forssen, J. Karlsson, F. Kronstedt, S. Mazur, K. J. Molnar, "Adaptive Antennas for GSM and TDMA Systems", *IEEE Personal Communications*, pp. 74-86, vol.6, June 1999
- 19 M. Goldberg, "Adaptive antenna tutorial: Spectral efficiency and spatial processing", Technical presentation, September 2001
- 20 A. Derneryd, B. Johannisson, "Adaptive base station antenna arrays", Ericsson review No3, 1999
- 21 S. Anderson, B. Carlqvist, B. Hagerman, R. Lagerholm, "Enhancing cellular network capacity with adaptive antennas", Ericsson review No3, 1999
- 22 P. Blom, "Ericsson's GSM RAN capacity solutions", Ericsson review No3, 1999
- 23 Symena Software & Consulting GmbH, "Smart antennas - a non technical introduction"
- 24 <http://www.metawave.com>, May 2001
- 25 <http://www.ericsson.com>, May 2001
- 26 <http://www.arraycomm.com>, May 2001









## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΟΛΗΣ ΣΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ - ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΛΕΣΜΗΣ ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΖΟΜΕΝΑ ΦΙΛΤΡΑ

#### 3.1 Γενικά στοιχεία

Τα σήματα παρεμβολής αποτελούν ένα από τα βασικότερα αίτια υποβάθμισης της απόδοσης οποιουδήποτε ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος [1]. Σαν σήμα παρεμβολής μπορεί να θεωρηθεί το κάθε σήμα προερχόμενο από πομπό πλην του ενδιαφέροντος. Πληθώρα τεχνικών έχουν αναπτυχθεί προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα που δημιουργούνται από την παρουσία παρεμβολικών σημάτων [2].

Παραδοσιακά, ένα φίλτρο με ανομοιόμορφη συνάρτηση απόκρισης συχνότητας στο εύρος συχνοτήτων του ενδιαφέροντος, μπορεί να καταστείλει ανεπιθύμητα σήματα που παρουσιάζονται στο σύστημα λήψης. Στην περίπτωση που τα παρεμβολικά σήματα εντοπιστούν σε συχνοτική περιοχή κοντινή αλλά υψηλότερη από την περιοχή συχνοτήτων ενδιαφέροντος, ένα χαμηλοπερατό φίλτρο (low pass filter) τα απομακρύνει. Εάν τα μη επιθυμητά σήματα εντοπιστούν σε συχνότητες κοντινές αλλά χαμηλότερες από τις συχνότητες ενδιαφέροντος, τότε ένα υψηλοπερατό φίλτρο (high pass filter) μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Τέλος σε πολλές περιπτώσεις και ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των παρεμβολέων, ζωνοπερατά φίλτρα (band pass filter) μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Να σημειωθεί ότι τα φίλτρα αποτελούν μια καλή λύση αποφυγής των παρεμβολέων αλλά όχι την ιδανική καθώς το φίλτρο επηρεάζει ταυτόχρονα και το σήμα ενδιαφέροντος ανάλογα με τη μορφή του και αυτή του επιθυμητού σήματος [3].

Ένα δεύτερο μέσο καταστολής των σημάτων παρεμβολής αποτελούν τα προσαρμοστικά φίλτρα (matched filters) τα οποία και αφήνουν ανέπαφο τη σήμα ενδιαφέροντος. Η φιλοσοφία των φίλτρων αυτών ξεκίνησε από την πρωτοποριακή δουλειά του Wiener για τη δημιουργία του ιδανικού φίλτρου και την εξέλιξή της από τους Kalman και Kailath. Τα προσαρμοστικά φίλτρα μπορεί να είναι σταθερά ή να προσαρμόζονται (adaptive filters) ανάλογα με τις συνθήκες [3].

Σε αντίθεση με τη φιλοσοφία των φίλτρων, οι ακυρωτές παρεμβολέων (interference cancellers) ουσιαστικά αναγνωρίζουν το σήμα παρεμβολής και δημιουργούν ένα σήμα ίσο και αντίθετο με το παρεμβολικό. Η άθροιση των δύο

αυτών σημάτων τα αλληλοεξουδετερώνει. Η σύνθεση του σήματος εξουδετέρωσης γίνεται λαμβάνοντας δείγματα από το σήμα παρεμβολής και δημιουργώντας ένα αντίθετο από αυτό σήμα. Αναλυτικότερα, από την άθροιση του σήματος ενδιαφέροντος  $S_D$  και του μη επιθυμητού σήματος  $S_U$  το οποίο και είναι ασυσχέτιστο με το επιθυμητό, προκύπτει το λαμβανόμενο σήμα. Ένα δεύτερο σήμα  $S_R$ , επίσης ασυσχέτιστο με το επιθυμητό σήμα αλλά συσχετισμένο με το παρεμβολικό σήμα  $S_U$ , χρησιμοποιείται ως το σήμα αναφοράς για τον ακυρωτή. Το σήμα αναφοράς φιλτράρεται ώστε το σήμα  $y$  που θα προκύψει να είναι ίσο όσο το δυνατόν περισσότερο με το μη επιθυμητό σήμα  $S_U$ . Το σήμα εξόδου του φίλτρου  $y$  αφαιρείται από το σήμα εισόδου στον ακυρωτή και προκύπτει το σήμα εξόδου του ακυρωτή  $Z = S_D + S_U - y$ . Το σήμα  $Z$  ονομάζεται σήμα λάθους και σκοπός του ακυρωτή, με τη βοήθεια επαναληπτικών αλγόριθμων όπως οι LMS και RLS, είναι η ελαχιστοποίησή του με κατάλληλες ρυθμίσεις του φίλτρου [3].

Τέλος, εκτός από τα φίλτρα, για την αντιμετώπιση των παρεμβολών μπορούν να χρησιμοποιηθούν κεραιοσυστήματα. Ένα κεραιοσύστημα λήψης σήματος ή ένα σύστημα ραντάρ, μπορούν να αντιμετωπίσουν παρεμβολικά σήματα πολλαπλές φορές ισχυρότερα από τα επιθυμητά σήματα. Οι παρεμβολείς μπορεί να εμφανιστούν από διάφορες διευθύνσεις και με άγνωστα στο σύστημα λήψης χαρακτηριστικά. Τα συστήματα ευφών κεραιοσυστημάτων, έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας τα τελευταία χρόνια [4-6]. Για αυτή την κατηγορία θα γίνει εκτεταμένη ανάλυση σε επόμενο κεφάλαιο.

Όπως έχει αναφερθεί, στις μεθόδους καταστολής σημάτων που θεωρούνται μη επιθυμητά για το σύστημα, εντάσσονται και οι μέθοδοι των προσαρμοζόμενων φίλτρων. Επί της ουσίας, τα προσαρμοζόμενα φίλτρα εμπλέκονται στη στατιστική ανάλυση των σημάτων. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχει ανάγκη επεξεργασίας σημάτων τα οποία έχουν υποστεί παραμόρφωση λόγω ενός άγνωστου στατιστικά περιβάλλοντος, τα φίλτρα αυτά παρέχουν ικανοποιητικές λύσεις στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Επιπρόσθετα, είναι πιο αποδοτικά σε σχέση με τα σταθερά φίλτρα που σχεδιάζονται με συμβατικές μεθόδους [7]. Τα προσαρμοζόμενα φίλτρα έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως οι τηλεπικοινωνίες, συστήματα ελέγχου, ραντάρ, σόναρ, σεισμολογία και στην βιοϊατρική.

Στη οικογένεια των προσαρμοζόμενων φίλτρων διακρίνονται τρεις βασικές κατηγορίες [7]. Η πρώτη αναφέρεται ως γραμμικά βελτιστοποιημένα φίλτρα (Linear Optimum Filters) και σε αυτή εντάσσονται τα φίλτρα Wiener, η θεωρία της μεθόδου

της γραμμικής πρόβλεψης και τα φίλτρα Kalman. Το θεωρητικό πλαίσιο που διαμορφώνει η ανάπτυξη των φίλτρων Wiener και Kalman, οδηγεί στη δεύτερη μεγάλη κατηγορία φίλτρων, τα γραμμικά προσαρμοζόμενα φίλτρα (Linear Adaptive Filters). Σε αυτή την κατηγορία συναντούνται δύο μεγάλες οικογένειες αλγορίθμων : ο αλγόριθμος LMS (Least Mean Square) και ο αλγόριθμος RLS (Recursive Least Squares). Με τη βοήθεια αυτών των δύο αλγορίθμων επιλέγονται τα χαρακτηριστικά των προσαρμοζόμενων φίλτρων όπως αυτά προκύπτουν από τη στατιστική ανάλυση των σημάτων. Αναλυτικότερα, ο κλασικός LMS αλγόριθμος προκύπτει από τη μέθοδο steepest descent και τη θεωρία των φίλτρων Wiener. Εκτός της κλασικής μορφής, υπάρχουν ακόμη δύο εκδόσεις στο επίπεδο του χρόνου και στο επίπεδο της συχνότητας. Ο αλγόριθμος RLS, αναπτύχθηκε με βάση τη θεωρία των φίλτρων Kalman. Συναντάται σε τρεις βασικές μορφές : την κλασική μορφή, τη μορφή square-root και τη μορφή order-recursive. Η τρίτη κατηγορία φίλτρων είναι τα μη γραμμικά προσαρμοζόμενα φίλτρα (Non Linear Adaptive Filters). Σε αυτή την κατηγορία εντάσσεται το πρόβλημα της τυφλής αποσυνέλιξης (Blind Deconvolution) και οι τρόποι λύσης του προβλήματος με μη γραμμικές τροποποιήσεις των συμβατικών αλγορίθμων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για τα συστήματα πολυπλεξίας χρόνου (TDMA), έχει ιδιαίτερη σημασία ο χρόνος απόκρισης των προσαρμοζόμενων φίλτρων, ώστε να είναι δυνατή η γρήγορη απομάκρυνση των συνιστωσών του λαμβανόμενου σήματος που μπορεί να επιφέρουν πρόβλημα στην επικοινωνία. Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί και αντίστοιχα φίλτρα έχουν προταθεί [8-10].

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, η θεωρία των προσαρμοζόμενων φίλτρων έχει χρησιμοποιηθεί με σκοπό την ψηφιακή διαμόρφωση δέσμης. Στις ακόλουθες παραγράφους θα αναπτυχθεί το μοντέλο ενός συστήματος καταστολής σήματος παρεμβολής που θα επιτυγχάνεται με την προσαρμογή φίλτρου στα στατιστικά στοιχεία των λαμβανομένων σημάτων. Το σύστημα αυτό έχει τροποποιηθεί ώστε να ανταποκρίνεται στο σύστημα κυψελωτής τηλεφωνίας GSM.

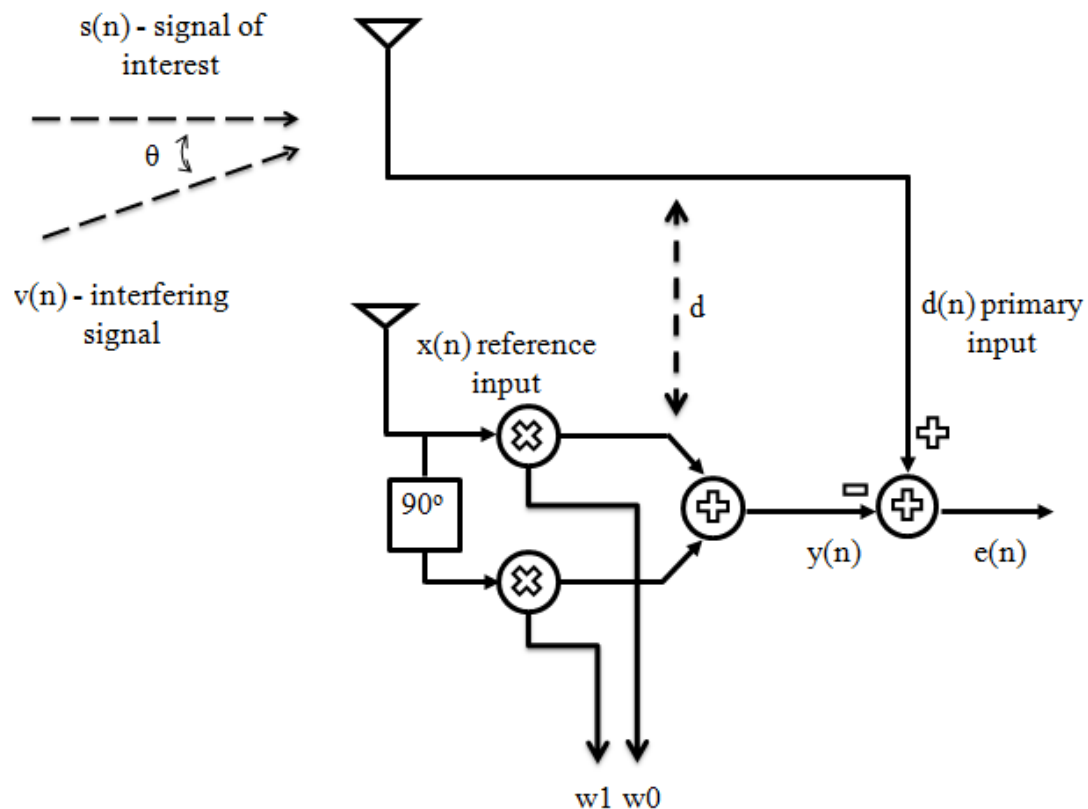
### **3.2 Μοντέλο συστήματος**

Η ψηφιακή διαμόρφωση δέσμης, αποτελεί μια αποτελεσματική τεχνική καταστολής σημάτων παρεμβολής σε ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο [11]. Το σύστημα που θα εξεταστεί και θα αξιολογηθεί στην ακόλουθη παράγραφο

αποτελείται από δύο ομοιοκατευθυντικές κεραιές και ένα προσαρμοστικό φίλτρο (φίλτρο Wiener) το οποίο είναι συνδεδεμένο στη μια από τις δυο κεραιές [12]. Η αρχιτεκτονική του συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.1. Αναλυτικότερα, η απόσταση μεταξύ των κεραιών είναι  $d$ , ενώ τα μιγαδικά διανύσματα βάρους  $w_1$  και  $w_2$  ουσιαστικά εκφράζουν τις κατάλληλες κωδικολέξεις για να επιτευχθεί η καταστολή του σήματος παρεμβολής  $v(n)$  με γωνία άφιξης (Direction-of-Arrival DoA) ίση με  $\theta^\circ$  ως προς το επιθυμητό σήμα. Το κεραιοσύστημα, χρησιμοποιώντας μια σύντομη ακολουθία εκπαίδευσης (training sequence bit-stream), προσαρμόζει γρήγορα το διάγραμμα ακτινοβολίας και ελαχιστοποιεί το επίπεδο λήψης προς την κατεύθυνση του σήματος παρεμβολής.

Το μαθηματικό μοντέλο για το επιθυμητό σήμα δίνεται από τη σχέση :

$$s(n) = a(n) \cos(n\omega_0 + \varphi_1) \quad (3.1)$$



Σχήμα 3.1 Σύστημα καταστολής σήματος παρεμβολής [12]

ενώ το σήμα παρεμβολής δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$v(n) = b(n) \cos(n\omega_0 + \varphi_2) \quad (3.2)$$

Τα  $a(n)$  και  $b(n)$  θεωρούνται σήματα στενής ζώνης και βασικής συχνότητας, ενώ  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  οι γωνιακές φάσεις οι οποίες θεωρείται ότι ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή. Με βάση όλα τα παραπάνω, τα  $s(n)$  και  $v(n)$  είναι σήματα στενής ζώνης με κεντρική γωνιακή συχνότητα  $\omega = \omega_0$ . Το επιθυμητό σήμα λαμβάνεται από το κεραιοσύστημα με κατεύθυνση κάθετη στην ευθεία που ενώνει τις δύο ομοιοκατευθυντικές κεραιές. Το μη επιθυμητό σήμα καταφτάνει με γωνία άφιξης  $\theta_0$  σε σχέση με τη γωνία άφιξης του επιθυμητού σήματος.

Το σήμα στην έξοδο του συστήματος λήψης δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} e(n) &= d(n) - y(n) \\ &= d(n) - w^T * x(n) \end{aligned} \quad (3.3)$$

όπου

$$d(n) = a(n) \cos(n\omega_0 + \varphi_1) + b(n) \cos(n\omega_0 + \varphi_2 - \varphi_0) \quad (3.4)$$

$d = \lambda/2$  η απόσταση μεταξύ των κεραιών,

$$\varphi_0 = \frac{d \sin \theta_0}{c} \omega_0 = \frac{\lambda}{2} \frac{\sin \theta_0}{c} \omega_0 = \frac{\lambda}{2} \frac{\sin \theta_0}{c} \frac{2\pi c}{\lambda} = \pi \sin \theta_0,$$

$w = [w_0 \ w_1]^T$  το διάνυσμα των συντελεστών και  $x(n) = \begin{bmatrix} x(n) \\ \tilde{x}(n) \end{bmatrix}$  όπου

$$x(n) = a(n) \cos(n\omega_0 + \varphi_1) + b(n) \cos(n\omega_0 + \varphi_2) \quad (3.5)$$

και

$$\tilde{x}(n) = a(n)\cos(n\omega_0 + \varphi_1) + b(n)\cos(n\omega_0 + \varphi_2 - \pi/2) \quad (3.6)$$

Οπότε

$$x(n) = \begin{bmatrix} a(n)\cos(n\omega_0 + \varphi_1) + b(n)\cos(n\omega_0 + \varphi_2) \\ a(n)\cos(n\omega_0 + \varphi_1) + b(n)\sin(n\omega_0 + \varphi_2) \end{bmatrix}$$

Το σύστημα διαμόρφωσης δέσμης, ελαχιστοποιεί το επίπεδο λήψης στην κατεύθυνση του σήματος παρεμβολής επιλέγοντας το κατάλληλο διάνυσμα συντελεστών ώστε η μέση τετραγωνική τιμή του σήματος  $e(n)$  να ελαχιστοποιηθεί.

Αναλυτικότερα, για συγκεκριμένες τιμές των μιγαδικών συντελεστών  $w_0$  και  $w_1$  και για σήμα το οποίο καταφθάνει με γωνία  $\theta$ , το κέρδος ισχύος του συστήματος  $G(\theta)$  δίνεται ως ο λόγος ισχύος του σήματος εξόδου  $e(n)$  προς την ισχύ του σήματος εισόδου σε μια από τις δύο ομοιοκατευθυντικές κεραίες. Υποθέτοντας ότι ένα σήμα στενής ζώνης  $\gamma(n) = \cos(n\omega_0)$  καταφθάνει στο σύστημα υπό γωνία  $\theta$  και θεωρείται μη επιθυμητό, τότε έχουμε

$$\begin{aligned} d(n) &= \gamma(n)\cos(n\omega_0 - \varphi_0) \\ &= \gamma(n)\cos(n\omega_0 - \pi \sin \theta) \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$x(n) = \gamma(n)\cos(n\omega_0) \quad (3.8)$$

οπότε προκύπτει ότι

$$e(n) = \gamma(n)[\cos(n\omega_0 - \pi \sin \theta) - w_0 \cos(n\omega_0) - w_1 \cos(n\omega_0)] \quad (3.9)$$

$$= \gamma(n)[(\cos(\pi \sin \theta) - w_0)\cos(n\omega_0) + (\sin(\pi \sin \theta) - w_1)\sin(n\omega_0)] \quad (3.10)$$

Γίνεται αντιληπτό από την (3.10) ότι η ελαχιστοποίηση του  $e(n)$  επιτυγχάνεται όταν

$$w_0 = \cos(\pi \sin \theta) \quad (3.11)$$



$$w_1 = \sin(\pi \sin \theta) \quad (3.12)$$

Τέλος η σχέση (3.10) μπορεί να πάρει τη μορφή

$$e(n) = a(\theta)\gamma(n)\sin(n\omega_0 + \phi(\theta)) \quad (3.13)$$

όπου

$$a(\theta) = \sqrt{(\cos(\pi \sin \theta) - w_0)^2 + (\sin(\pi \sin \theta) - w_1)^2} \quad (3.14)$$

και

$$\phi(\theta) = \tan^{-1}\left(\frac{\cos(\pi \sin \theta) - w_0}{\sin(\pi \sin \theta) - w_1}\right) \quad (3.15)$$

Για ένα διαμορφωτή δέσμης όπως ο συγκεκριμένος, το κέρδος  $G(\theta)$  (array power gain) εκφράζεται ως ο λόγος της ισχύος του σήματος εξόδου  $e(n)$  προς το σήμα σε μια από τις δυο ομοιοκατευθυντικές κεραίες:

$$G(\theta) = \frac{E[e(n)^2]}{E[d(n)^2]} \quad (3.16)$$

$$= a(\theta)^2 \quad (3.17)$$

$$= (\cos(\pi \sin \theta) - w_0)^2 + (\sin(\pi \sin \theta) - w_1)^2 \quad (3.18)$$

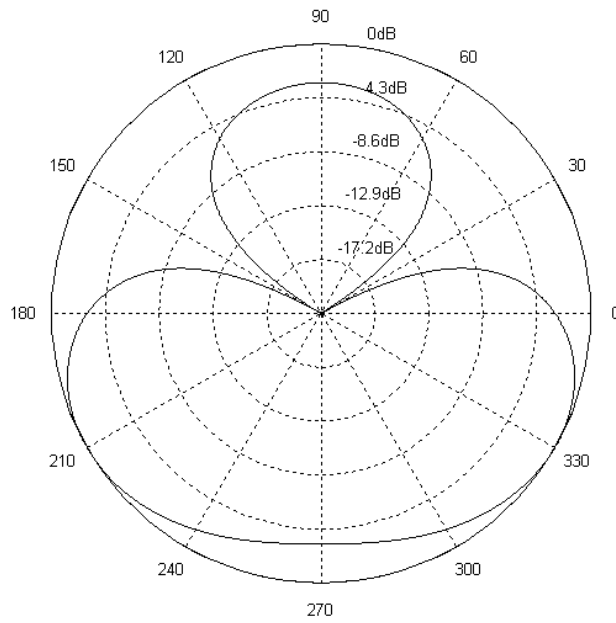
Η σημαντικότερη ιδιότητα του εν λόγω συστήματος λήψης είναι ότι ακολουθεί το νόμο της αντιστρόφου ισχύος (power inversion law) [12]. Ο λόγος της πυκνότητας ισχύος του σήματος προς της πυκνότητας ισχύος του θορύβου στην έξοδο του συστήματος είναι αντιστρόφως ανάλογος με το λόγο στην είσοδο αναφοράς (reference input) του συστήματος. Με βάση το τελευταίο, όταν στην είσοδο του συστήματος ο λόγος έχει μικρή τιμή και επομένως το σήμα παρεμβολής είναι ισχυρότερο από το επιθυμητό σήμα, η καταστολή είναι αποτελεσματική. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν το σήμα θορύβου είναι ασθενές ή συγκρίσιμο με το επιθυμητό σήμα,

η επίδοση του συστήματος είναι υποβαθμισμένη. Συμπερασματικά, καλά αποτελέσματα αναμένονται όταν το σήμα παρεμβολής είναι ισχυρό και το σήμα ενδιαφέροντος είναι συγκριτικά ασθενέστερο.

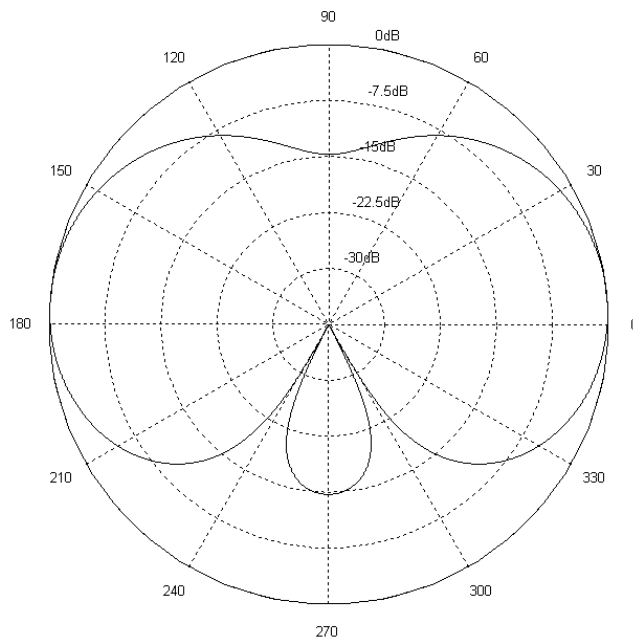
### 3.3 Αριθμητικά αποτελέσματα

Το σύστημα λήψης προσαρμόζει το διάγραμμα ακτινοβολίας του μέσω του αποτελέσματος από τη συσχέτιση γνωστής ακολουθίας bits με την αντίστοιχη λαμβανόμενη. Η διαδικασία αυτή ολοκληρώνεται κατά τη διάρκεια της ακολουθίας εκπαίδευσης. Μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα, το σύστημα λήψης προσαρμόζει την τιμή του μιγαδικού διανύσματος συντελεστών με σκοπό την ελαχιστοποίηση της τιμής λάθους που προκύπτει από τη σχέση (3.3). Στο προτεινόμενο σύστημα λήψης, το οποίο και έχει προσομοιωθεί, το μήκος της ακολουθίας εκπαίδευσης έχει θεωρηθεί μεταβλητό με τιμές από 20 μέχρι και 100 bits.

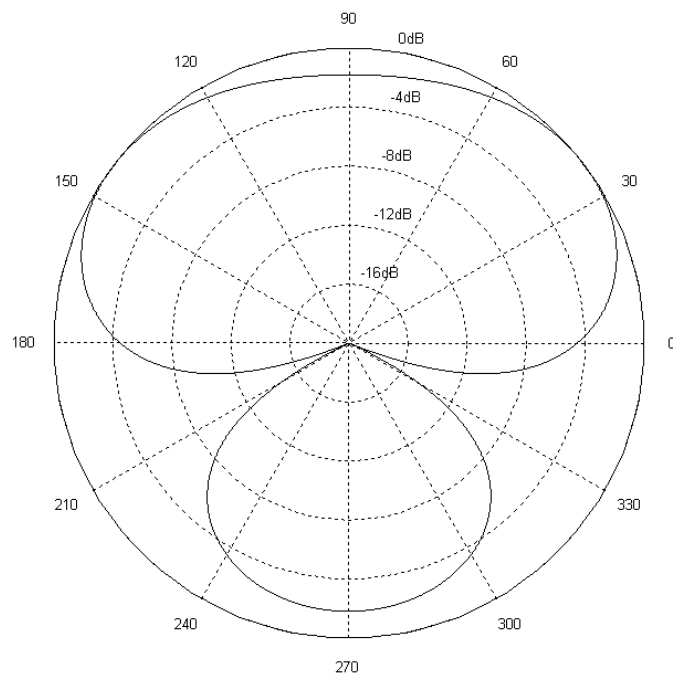
Ένα σημαντικό σημείο που πρέπει να τονιστεί και έχει αναφερθεί στην προηγούμενη παράγραφο, είναι το γεγονός ότι το σύστημα λήψης ακολουθεί το νόμο της αντιστρόφου ισχύος (power inversion law). Για να επιβεβαιωθεί ο νόμος θεωρήθηκε ότι το σήμα παρεμβολής είναι 5 έως 20 φορές ισχυρότερο σε σχέση με το επιθυμητό σήμα. Τα αποτελέσματα για σήμα παρεμβολής 20 φορές πιο ενισχυμένο αναμενόταν να είναι βελτιωμένα σε σχέση με αυτά όταν το σήμα παρεμβολής είναι 5 φορές ισχυρότερο. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό MATLAB [12-14]. Στο ακόλουθο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το κανονικοποιημένο διάγραμμα λήψης του κεραιοσυστήματος όταν η ακολουθία εκπαίδευσης είναι ίση με 60 bits, το σήμα παρεμβολής είναι δέκα φορές ισχυρότερο από το επιθυμητό και το παρεμβολικό σήμα έχει γωνία άφιξης ίση με  $30^\circ$  [13-14]. Αντίστοιχα, στα σχήματα 3.3, 3.4 και 3.5 παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα διαγράμματα λήψης του κεραιοσυστήματος όταν η γωνία άφιξης είναι ίση με  $240^\circ$ ,  $330^\circ$  και  $60^\circ$  αντίστοιχα ενώ το μήκος της ακολουθίας εκπαίδευσης έχει μειωθεί στα 26 bits. Να σημειωθεί ότι 26 bits μήκος έχουν οι ακολουθίες εκπαίδευσης του air-interface στο κυψελωτό σύστημα κινητής τηλεφωνίας GSM [15-17].



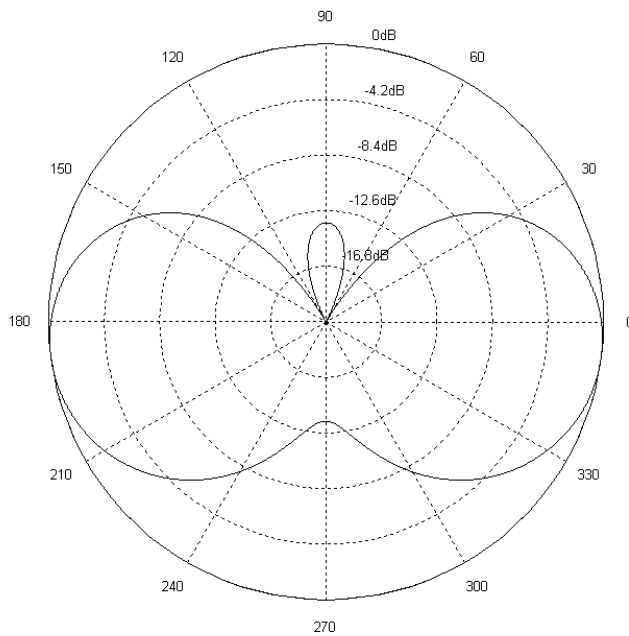
Σχήμα 3.2 Κανονικοποιημένο διάγραμμα λήψης με γωνία άφιξης παρεμβολέα ίση με  $30^\circ$



Σχήμα 3.3 Κανονικοποιημένο διάγραμμα λήψης με γωνία άφιξης παρεμβολέα ίση με  $240^\circ$



Σχήμα 3.4 Κανονικοποιημένο διάγραμμα λήψης με γωνία άφιξης παρεμβολέα ίση με  $330^\circ$

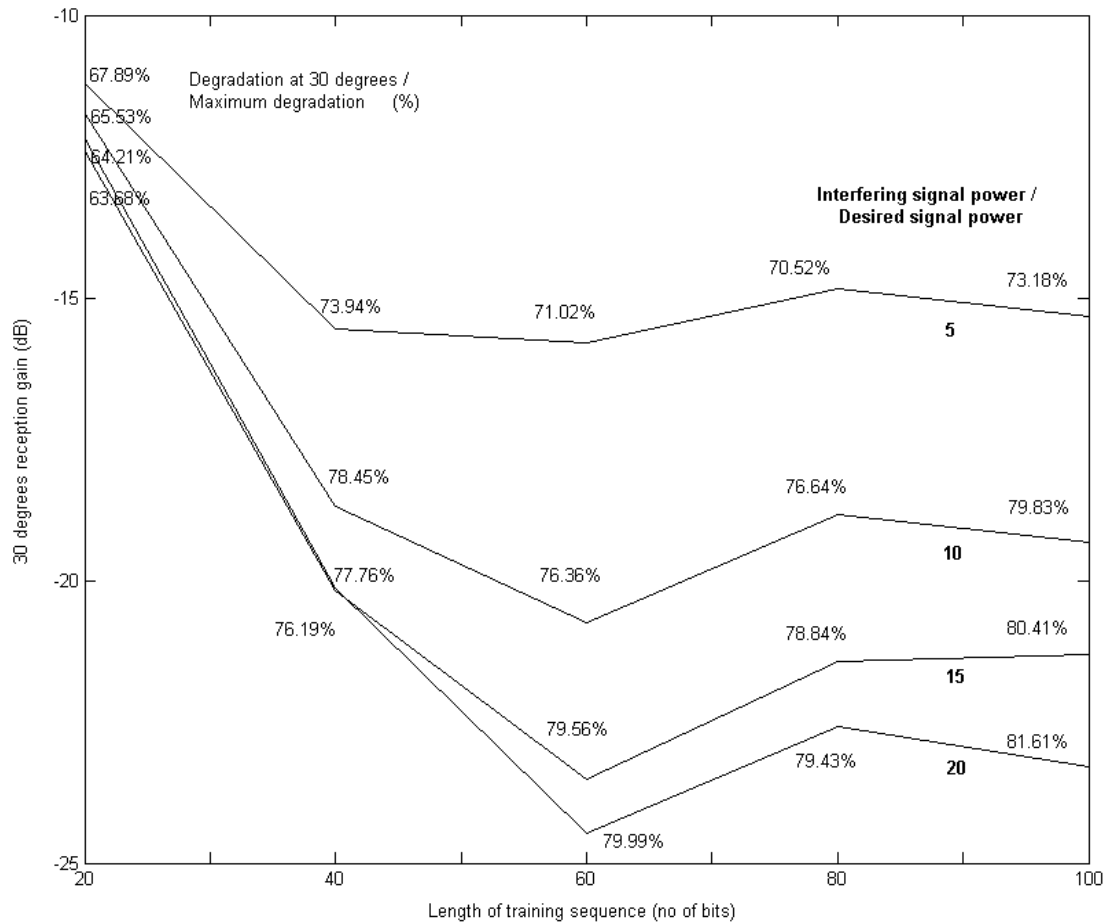


Σχήμα 3.5 Κανονικοποιημένο διάγραμμα λήψης με γωνία άφιξης παρεμβολέα ίση με  $60^\circ$

Από τα σχήματα 3.2 – 3.5 γίνεται απόλυτα κατανοητό ότι ο βαθμός απόρριψης του μη επιθυμητού σήματος είναι σημαντικός. Στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, το παρεμβολικό σήμα υπόκειται εξασθένιση μεγαλύτερη των 17dB. Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται το κανονικοποιημένο επίπεδο λήψης του κεραιοσυστήματος στις 30° (θεωρείται η γωνία άφιξης του παρεμβολέα) σε σχέση με το μήκος της ακολουθίας εκπαίδευσης και το λόγο ισχύος του παρεμβολικού προς το επιθυμητό σήμα. Επιπρόσθετα, ο λόγος απόσβεσης στις 30° προς τη μέγιστη δυνατή απόσβεση, παρουσιάζεται σε ποσοστιαία μορφή με σκοπό να αναδειχθεί η αποδοτικότητα του συστήματος και να διαμορφωθεί ένα είδος δείκτη επίδοσης (key performance indicator).

Εύκολα γίνεται αντιληπτό από το σχήμα 3.6 ότι όσο πιο δυνατό είναι το σήμα παρεμβολής συγκρινόμενο με το επιθυμητό σήμα, τόσο καλύτερο αποτέλεσμα προκύπτει σχετικά με την απομάκρυνση του μη επιθυμητού σήματος. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο και αποτελεί επιβεβαίωση του νόμου αντιστρόφου ισχύος. Επιπρόσθετα, μια ακολουθία εκπαίδευσης μήκους 60 bits φαίνεται να είναι η πιο αποδοτική καθώς όταν εφαρμόζεται, εμφανίζεται η μέγιστη εξασθένιση. Αναμενόμενο θα ήταν με ακολουθίες μεγαλύτερου μήκους να υπήρχε μεγαλύτερη απόσβεση για το παρεμβολικό σήμα. Κάτι τέτοιο δεν προκύπτει από τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Ένα τελευταίο σημείο στο οποίο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση είναι το γεγονός ότι ο λόγος απόσβεσης στις 30° προς τη μέγιστη δυνατή απόσβεση, κυμαίνεται από 0,63 έως 0,82. Οι τιμές αυτές μπορούν να θεωρηθούν ικανοποιητικές δεδομένης της απλής αρχιτεκτονικής πάνω στην οποία έχει δομηθεί το σύστημα.



Σχήμα 3.6 Κανονικοποιημένο επίπεδο λήψης στις 30° σε σχέση με μήκος ακολουθίας εκπαίδευσης και λόγο ισχύος παρεμβολικού προς επιθυμητό σήμα

### 3.4 Βιβλιογραφία

- 1 R. Perez, *Wireless Communications Design Handbook: Space Interference*, Academic Press, 1998
- 2 D. Popesku, C. Rose, *Interference Avoidance Methods for Wireless Systems*, Kluwer Academic, 2004
- 3 R. N. Ghose, *Interference mitigation Theory and Application*, IEEE Press, 1996
- 4 A. El-Zooghby, *Smart Antenna Engineering*, Artech House, 2005

- 5 C. Ibars, Y. Bar-Ness, "Interference cancellation for downlink TDMA systems using smart antennas", Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '99, vol. 4, pp 2233-2237, 1999
- 6 L. Hsin-Chin, J. F. Doherty, "Using multistage interference cancellation smart antennas in wideband CDMA uplink", Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, vol. 1, pp 433-437, 2003
- 7 S. Haykin, Adaptive Filter Theory, Prentice Hall, Third Edition
- 8 G. Aria, R. Piermarini, V. Zingarelli, "Fast Adaptive Equalizers for Narrow Band TDMA Mobile Radio", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.40, no.2, May 1991
- 9 J. G. Proakis, "Adaptive Equalization for TDMA Digital Mobile Radio", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.40, no.2, May 1991
- 10 B. A. Bjerke, J.G. Proakis, K.Y Martin Lee, Z. Zvonar, "A Comparison of GSM Receivers for Fading Multipath Channels with Adjacent- and Co-Channel Interference", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.18, no.11, November 2000
- 11 J. Litva, T. Kwon-Yeung Lo, *Digital beamforming in wireless communications*, Artech House, 1996
- 12 B. Farhang-Boroujeny, *Adaptive Filter Theory*, John Wiley and Sons, 1998
- 13 A.I Sotiriou, P.K Varlamos, P.T Trakadas and C. N. Capsalis, "Performance of a six-beam switched parasitic planar array under one path Rayleigh fading environment", Progress in Electromagnetic Research, PIER 62, pp. 89-106, 2006
- 14 A.I Sotiriou, P.T Trakadas and C. N. Capsalis, "Signal cancellation system using two omnidirectional antennas", 3rd International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, Kos Greece, 4-8 October 2004
- 15 ETSI Technical Specification TS 100 910 v8.16.0 (2003-08), Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio transmission and reception (3GPP TS 05.05 version 8.16.0 Release 1999)
- 16 A. Mehrotra, GSM system engineering, Artech House, 1997
- 17 M. Mouly, M. Pautet, The GSM system for mobile communications, Cell & Sys Correspondence, 1992









## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΓΩΝΙΑΣ ΑΦΙΞΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

#### 4.1 Γενικά στοιχεία

Πρόσφατες έρευνες σχετικές με τα ασύρματα δίκτυα τηλεπικοινωνιών 3G και 4G, ανέδειξαν ότι απαιτείται πλήρης γνώση των μηχανισμών ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης στο τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Ένα από τα σημαντικότερα θέματα υπό εξέταση, είναι η εκτίμηση της θέσης των πηγών που εκπέμπουν τόσο τα σήματα ενδιαφέροντος όσο και τα σήματα μη ενδιαφέροντος. Επομένως, η εύρεση των κατευθύνσεων από τις οποίες προέρχονται τα λαμβανόμενα σήματα, διερευνάται εκτενώς την τελευταία δεκαετία και πληθώρα μεθόδων έχουν προταθεί [1-5]. Ορισμένες από αυτές χρησιμοποιούνται ήδη σε ραντάρ και σόναρ όπως επίσης και για υπηρεσίες που βασίζονται στη θέση του χρήστη (personal locating services) [6]. Επιπρόσθετα, οι αλγόριθμοι εκτίμησης γωνίας άφιξης, χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό των κινητών τηλεφώνων καθώς οι χρήστες κινούνται ανάμεσα στις κυψέλες. Τροποποιημένοι αλγόριθμοι που μπορούν να λειτουργήσουν σε πραγματικό χρόνο (real time) έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμοι σε συστήματα Space Division Multiple Access (SDMA). Από την άλλη πλευρά και καθώς το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (Global Positioning Systems GPS) χρησιμοποιείται σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές, τα ευφυή κεραιοσυστήματα ικανά να διαχωρίσουν σήματα από πολλαπλές πηγές, μπορούν να βελτιώσουν την απόδοσή του [7-8]. Η γνώση των γωνιών άφιξης (Directions-of-Arrival DoA's) των εισερχομένων σημάτων στην ανερχόμενη ζεύξη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για διαφορική εκπομπή στην κατερχόμενη ζεύξη [8]. Επιπλέον, σε περιβάλλον πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath environment), οι αλγόριθμοι εκτίμησης γωνιών άφιξης παρέχουν το πλήθος, τις γωνίες άφιξης και τη σχετική ισχύ των ισχυρότερων λαμβανόμενων σημάτων [9].

Οι μέθοδοι εκτίμησης γωνιών που βασίζονται στη δομή πινάκων (array-based), μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται αλγόριθμοι που βασίζονται στην τεχνική συμβατικής διαμόρφωσης δέσμης και στην τεχνική φασματικής εκτίμησης (conventional beamforming και spectral estimation τεχνικές). Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τεχνικές που βασίζονται στη θεωρία των υποχώρων ή των ιδιοτιμών (subspace based ή

eigenstructure μέθοδοι). Στην τρίτη κατηγορία περιλαμβάνονται μέθοδοι μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood μέθοδοι) [9-10].

Η τεχνικές της συμβατικής διαμόρφωσης δέσμης βασίζονται στην ιδέα της ηλεκτρονικά ελεγχόμενης στροφής δέσμης. Στα πλαίσια αυτών των μεθόδων, πραγματοποιείται μέτρηση της λαμβανόμενης ισχύος από όλες τις πιθανές γωνίες άφιξης οπότε και προκύπτει το χωρικό φάσμα (spatial spectrum). Από τα τοπικά μέγιστα που εμφανίζονται στο χωρικό φάσμα, προκύπτουν οι γωνίες άφιξης των εισερχομένων σημάτων. Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας δεν είναι ιδιαίτερα πολύπλοκοι και επιπλέον είναι υπολογιστικά απλοί. Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι για να υπάρχει μεγάλη διακριτική ικανότητα, πρέπει να χρησιμοποιηθούν κεραιοσυστήματα με μεγάλο πλήθος στοιχείων. Επιπρόσθετα, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι η ακριβής γνώση των διανυσμάτων στροφής (steering vectors) για όλες τις γωνίες άφιξης είναι αναγκαία προϋπόθεση για την αποδοτική λειτουργία του συστήματος. Τα διανύσματα προκύπτουν μόνο εφόσον γίνει σωστή βαθμονόμηση του πίνακα που τα περιέχει. Τυπικά παραδείγματα μεθόδων αυτής της κατηγορίας είναι η μέθοδος delay-and-sum ή αλλιώς κλασική μέθοδος διαμόρφωσης δέσμης, η μέθοδος ελάχιστης διασποράς του Capon ή αλλιώς μέθοδος εκτίμησης MVDR και η μέθοδος γραμμικής εκτίμησης. Η μέθοδος εκτίμησης MVDR δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τη μέθοδο delay-and-sum αλλά αποτυγχάνει όταν παρουσιάζονται σήματα υψηλής συσχέτισης με το σήμα ενδιαφέροντος. Σχετικά με τη μέθοδο γραμμικής πρόβλεψης, λειτουργεί ικανοποιητικά σε περιβάλλον όπου ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι σχετικά χαμηλός και σε καταστάσεις όπου τα λαμβανόμενα σήματα έχουν περίπου την ίδια ισχύ [10].

Οι μέθοδοι που βασίζονται στη θεωρία των υποχώρων παρουσιάζουν μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα ενώ παράλληλα είναι εφικτοί από υπολογιστικής πλευράς. Το στοιχείο στο οποίο στηρίζεται η ανάπτυξή τους, είναι η εκμετάλλευση των ιδιοτιμών του πίνακα με τα δεδομένα εισόδου (input data matrix). Δύο βασικές οικογένειες αλγόριθμων συναντώνται σε αυτή την κατηγορία : ο αλγόριθμος MUSIC (MUltiple SIgnal Classification) με πλήθος παραλλαγών και ο αλγόριθμος ESPRIT (Estimation Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) [9]. Ο MUSIC είναι αλγόριθμος που δίνει εκτίμηση για κάποια χαρακτηριστικά του σήματος εισόδου όπως το πλήθος των λαμβανομένων σημάτων, τη γωνία άφιξης του κάθε λαμβανόμενου σήματος, τη σχετική ισχύ των σημάτων και την ετεροσυσχέτισή τους

[11]. Αν και ο αλγόριθμος έχει υψηλή διακριτική ικανότητα, απαιτείται πολύ ακριβής βαθμονόμηση του πίνακα εισόδου. Τα βασικά μειονεκτήματα του MUSIC είναι η αποτυχία σωστής εκτίμησης όταν τα σήματα που προσπίπτουν έχουν υψηλή συσχέτιση και το γεγονός ότι η διακριτική του ικανότητα περιορίζεται σε πλήθος σημάτων μικρότερο του πλήθους των στοιχείων που αποτελούν το κεραιοσύστημα. Από την άλλη πλευρά ο αλγόριθμος ESPRIT έχει λιγότερες απαιτήσεις σε υπολογιστικά θέματα αλλά και στο θέμα της ακριβούς βαθμονόμησης του πίνακα εισόδου, σε σύγκριση με τον MUSIC [9].

Οι μέθοδοι εκτίμησης γωνιών άφιξης που αναπτύσσονται με κριτήριο τη μέγιστη πιθανοφάνεια (Maximum Likelihood ML) δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα αλλά είναι εξαιρετικά απαιτητικές σε υπολογιστικά θέματα. Οι σχετικοί αλγόριθμοι είναι ανώτεροι από όλους τους άλλους και ειδικότερα σε περιβάλλοντα με χαμηλή σχέση σήματος προς θόρυβο ή όταν το πλήθος των δειγμάτων είναι μικρό και τα σήματα από τις διάφορες πηγές υψηλά συσχετισμένα μεταξύ τους. Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας βασίζονται στη μεγιστοποίηση της λογαριθμικής συνάρτησης πιθανοφάνειας από ένα πλήθος δειγμάτων του πίνακα εισόδου. Η συνάρτηση πιθανοφάνειας είναι η κοινή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των δειγμάτων εισόδου δεδομένων των γωνιών άφιξης. Η μεγιστοποίηση της λογαριθμικής συνάρτησης πιθανοφάνειας είναι ένα μη γραμμικό πολυδιάστατο πρόβλημα. Πολλές επαναληπτικές μέθοδοι έχουν προταθεί προκειμένου να απλουστευθεί η διαδικασία επίλυσης και να μειωθεί το υπολογιστικό φορτίο. Κάποιες από αυτές είναι ο αλγόριθμος gradient descent, η κλασική μέθοδος Newton-Raphson και τροποποιημένοι αλγόριθμοι προβολής [10].

Στο σημείο αυτό και προτού γίνει μια αναλυτικότερη παρουσίαση αλγορίθμων εκτίμησης γωνιών άφιξης, πρέπει να τονιστεί ότι η ανάπτυξη και εφαρμογή ολοκληρωμένων λύσεων με δέκτες που θα υποστηρίζουν διαμόρφωση δέσμης είναι άμεσα συνδεδεμένη με την πολυπλοκότητα και αρχιτεκτονική των αλγορίθμων αυτών [12].

#### **4.2 Εκτίμηση γωνιών άφιξης με τον αλγόριθμό MUSIC**

Η εκτίμηση γωνιών άφιξης με τον αλγόριθμο MUSIC εντάσσεται στην κατηγορία των τεχνικών υποχώρων ή ιδιοτιμών, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω. Αναπτύχθηκε από τον Schmidt [9] το 1979 και αποτελεί τεχνική μεγάλης ακρίβειας

που εκμεταλλεύεται τις ιδιοτιμές και τα ιδιοδυνάμια που προκύπτουν από τον πίνακα αυτοσυσχέτισης των σημάτων εισόδου του κεραιοσυστήματος. Ο MUSIC είναι αλγόριθμος εκτίμησης χαρακτηριστικών παραμέτρων των λαμβανομένων σημάτων και παρέχει τις εξής πληροφορίες: γωνία άφιξης, ισχύ, ετεροσυσχέτιση των σημάτων εισόδου, επίπεδο θορύβου κ.α. Ακολουθεί η πλήρης θεωρητική ανάλυση του αλγόριθμου [9], [13-14].

Θεωρώντας ότι  $D$  συνολικά σήματα λαμβάνονται από το κεραιοσύστημα  $M$  στοιχείων, τότε το λαμβανόμενο σήμα έχει τη μορφή

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{l=0}^{D-1} a(\varphi_l) s_l(t) + \mathbf{n}(t) \quad (4.1)$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} a(\varphi_0) & a(\varphi_1) & a(\varphi_2) & \dots & a(\varphi_{D-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0(t) \\ s_1(t) \\ s_2(t) \\ \dots \\ s_{D-1}(t) \end{bmatrix} + \mathbf{n}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (4.2)$$

Όπου

$\mathbf{s}^T(t) = [s_0(t) \ s_1(t) \ \dots \ s_{D-1}(t)]$  το διάνυσμα του σήματος εισόδου

$\mathbf{n}(t) = [n_0(t) \ n_1(t) \ \dots \ n_{D-1}(t)]$  το διάνυσμα του θορύβου

και  $\mathbf{a}(\varphi_j)$  το διάνυσμα στροφής πίνακα που αντιστοιχεί στη γωνία άφιξης του  $j$  σήματος

Με γεωμετρικούς όρους, τα διανύσματα  $\mathbf{u}$  και  $\mathbf{a}(\varphi_j)$  μπορούν να απεικονιστούν σαν διανύσματα σε χώρο διαστάσεων  $M$ . Από τη σχέση (4.2) φαίνεται ότι το διάνυσμα σημάτων εισόδου μπορεί να εκφραστεί σαν γραμμικός συνδυασμός του διανύσματος στροφής με τα σήματα  $s_0(t) \ s_1(t) \ \dots \ s_{D-1}(t)$  να αποτελούν συντελεστές. Επομένως ο πίνακας αυτοσυσχέτισης εισόδου μπορεί να εκφραστεί

$$\mathbf{R}_{uu} = E[\mathbf{u}\mathbf{u}^H] = \mathbf{A}E[\mathbf{s}\mathbf{s}^H]\mathbf{A}^H + E[\mathbf{n}\mathbf{n}^H] = \mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H + \sigma_n^2\mathbf{I} \quad (4.3)$$

όπου

$\mathbf{R}_{ss}$  ο πίνακας αυτοσυσχέτισης σημάτων

Οι ιδιοτιμές του  $\mathbf{R}_{uu}$   $\{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{M-1}\}$ , προκύπτουν από τη σχέση

$$\begin{aligned} |\mathbf{R}_{uu} - \lambda_i \mathbf{I}| = 0 &\Rightarrow |\mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I} - \lambda_i \mathbf{I}| = 0 \Rightarrow |\mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H + (\sigma_n^2 - \lambda_i) \mathbf{I}| = 0 \\ &\Rightarrow |\mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H - (\lambda_i - \sigma_n^2) \mathbf{I}| = 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Από την (4.4) προκύπτει ότι οι ιδιοτιμές  $\nu_i$  του  $\mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H$  είναι

$$\nu_i = \lambda_i - \sigma_n^2 \quad (4.5)$$

Βασιζόμενοι στη γραμμική άλγεβρα και από τη δομή και τις ιδιότητες των πινάκων  $\mathbf{A}$  και  $\mathbf{R}_{ss}$ , προκύπτει ότι  $M-D$  πλήθος ιδιοτιμών  $\nu_i$  του πίνακα  $\mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H$  είναι μηδενικές. Επομένως,  $M-D$  πλήθος ιδιοτιμών  $\lambda_i$  του πίνακα  $\mathbf{R}_{uu}$  είναι ίσες με  $\sigma_n^2$ . Υποθέτοντας ότι  $\lambda_0$  είναι η μεγαλύτερη ιδιοτιμή και  $\lambda_{M-1}$  η μικρότερη ιδιοτιμή τότε

$$\lambda_D, \lambda_{D+1}, \dots, \lambda_{M-1} = \sigma_n^2 \quad (4.6)$$

Πρακτικά, ο πίνακας  $\mathbf{R}_{uu}$  υπολογίζεται από πεπερασμένο πλήθος δειγμάτων και επομένως οι ιδιοτιμές της σχέσης (4.6) προσεγγίζουν την τιμή  $\sigma_n^2$  αλλά δεν είναι απόλυτα ίσες. Η απόκλιση που παρουσιάζεται από την τιμή  $\sigma_n^2$  γίνεται μικρότερη καθώς το πλήθος δειγμάτων για τον υπολογισμό του  $\mathbf{R}_{uu}$  μεγαλώνει.

Εφόσον υπολογιστεί η πολλαπλότητα  $K$  της μικρότερης ιδιοτιμής από τις  $\lambda_D, \lambda_{D+1}, \dots, \lambda_{M-1}$ , μια εκτίμηση του πλήθους των λαμβανόμενων σημάτων προκύπτει από τη σχέση  $M = D + K$ . Το εκτιμώμενο πλήθος είναι

$$\hat{D} = M - K \quad (4.7)$$

Τα ιδιοδιανύσματα  $q_i$  που προκύπτουν από συγκεκριμένες ιδιοτιμές  $\lambda_i$  δίνονται από τη σχέση

$$(\mathbf{R}_{uu} - \lambda_i \mathbf{I})\mathbf{q}_i = 0 \quad (4.8)$$

Τα ιδιοδιανύσματα  $q_i$  που προκύπτουν από τις  $M-D$  μικρότερες ιδιοτιμές  $\lambda_D, \lambda_{D+1}, \dots, \lambda_{M-1} = \sigma_n^2$  δίνονται από τη σχέση

$$(\mathbf{R}_{uu} - \sigma_n^2 \mathbf{I})\mathbf{q}_i = \mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H\mathbf{q}_i + \sigma_n^2 \mathbf{I} - \sigma_n^2 \mathbf{I} = \mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H\mathbf{q}_i = 0 \quad (4.9)$$

$$\mathbf{A}^H\mathbf{q}_i = 0 \quad (4.10)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}^H(\varphi_0)\mathbf{q}_i \\ \mathbf{a}^H(\varphi_{D-1})\mathbf{q}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Από τη σχέση (4.11) προκύπτει ότι τα ιδιοδιανύσματα από τις  $M-D$  μικρότερες ιδιοτιμές, είναι ορθογώνια με τα  $D$  διανύσματα στροφής πίνακα που αποτελούν τον πίνακα  $\mathbf{A}$ .

$$\{\boldsymbol{\alpha}(\varphi_0), \boldsymbol{\alpha}(\varphi_1), \dots, \boldsymbol{\alpha}(\varphi_{D-1}),\} \perp \{\mathbf{q}_D, \mathbf{q}_{D+1}, \dots, \mathbf{q}_{M-1},\} \quad (4.12)$$

Το βασικότερο συμπέρασμα που εξάγεται από την παραπάνω ανάλυση του αλγόριθμου MUSIC είναι το ακόλουθο : προκειμένου να εξευρεθούν τα διανύσματα στροφής που σχετίζονται με τα λαμβανόμενα σήματα, πρέπει να υπολογιστούν τα διανύσματα εκείνα που είναι ορθογώνια με τα ιδιοδιανύσματα που προκύπτουν από τις ιδιοτιμές του  $\mathbf{R}_{uu}$  και έχουν τιμή ίση με  $\sigma_n^2$ .

Συμπερασματικά, τα ιδιοδιανύσματα του πίνακα αυτοσυσχέτισης  $\mathbf{R}_{uu}$  μπορεί να ανήκουν σε ένα από δύο ορθογώνιους υποχώρους : το βασικό υποχώρο (υποχώρος σημάτων) ή στο μη βασικό υποχώρο (υποχώρος θορύβου). Τα διανύσματα στροφής



που αντιστοιχίζονται σε γωνίες άφιξης λαμβανομένων σημάτων, ανήκουν στον βασικό υποχώρο και επομένως είναι ορθογώνια με τον υποχώρο του θορύβου. Αναζητώντας λοιπόν, μέσα από όλα τα πιθανά διανύσματα στροφής, αυτά που είναι ορθογώνια στο χώρο που ορίζεται από τα μη βασικά ιδιοδιανύσματα (ιδιοδιανύσματα θορύβου), μπορούν να καθοριστούν οι γωνίες άφιξης των λαμβανόμενων σημάτων.

Προκειμένου να επεξεργαστεί ο υποχώρος θορύβου, ορίζεται ο πίνακας που περιέχει τα ιδιοδιανύσματα θορύβου :

$$\mathbf{V}_n = [\mathbf{q}_D \ \mathbf{q}_{D+1} \ \dots \ \mathbf{q}_{M-1}] \quad (4.13)$$

Εφόσον τα διανύσματα στροφής αντιστοιχίζονται σε λαμβανόμενα σήματα, είναι ορθογώνια με τα ιδιοδιανύσματα του υποχώρου θορύβου :

$$\mathbf{a}^H(\varphi)\mathbf{V}_n\mathbf{V}_n^H\mathbf{a}(\varphi)=0 \quad (4.14)$$

όπου  $\varphi$  οι γωνίες άφιξης

Τελικά, οι γωνίες άφιξης προκύπτουν από τα μέγιστα που εμφανίζονται στο χωρικό φάσμα MUSIC

$$P_{MUSIC}(\varphi) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\varphi)\mathbf{V}_n\mathbf{V}_n^H\mathbf{a}(\varphi)} \quad (4.15)$$

ή εναλλακτικά

$$P_{MUSIC}(\varphi) = \frac{\mathbf{a}^H(\varphi)\mathbf{a}(\varphi)}{\mathbf{a}^H(\varphi)\mathbf{V}_n\mathbf{V}_n^H\mathbf{a}(\varphi)} \quad (4.16)$$

Η ορθογωνιότητα μεταξύ  $\mathbf{a}(\varphi)$  και  $\mathbf{V}_n$ , θα ελαχιστοποιήσει τον παρονομαστή και επομένως θα μεγιστοποιηθούν οι σχέσεις (4.15) και (4.16). Τα  $\hat{D} = M - K$  μέγιστα που προκύπτουν, αντιστοιχούν στις γωνίες άφιξης των σημάτων.

Αφού καθοριστούν οι γωνίες τότε ο πίνακας αυτοσυσχέτισης των σημάτων μπορεί να υπολογιστεί :

$$\mathbf{R}_{ss} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H (\mathbf{R}_{uu} - \lambda_{\min} \mathbf{I}) \mathbf{A} (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \quad (4.17)$$

Από την (4.17), οι ισχύς και ετεροσυσχετίσεις ανάμεσα στα σήματα μπορούν εύκολα να υπολογιστούν.

Συνοπτικά, ο αλγόριθμος MUSIC περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα

1) Συλλογή δειγμάτων  $\mathbf{u}_k$   $k=0, 1, \dots, K-1$  και υπολογισμός της εκτίμησης του πίνακα αυτοσυσχέτισης εισόδου

$$\hat{\mathbf{R}}_{uu} = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k^H \quad (4.18)$$

2) Ανάλυση του  $\hat{\mathbf{R}}_{uu}$

$$\hat{\mathbf{R}}_{uu} \mathbf{V} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \quad (4.19)$$

με  $\mathbf{\Lambda} = \text{diag} \{ \lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{M-1} \}$ ,  $\lambda_0 \geq \lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_{M-1}$  ο πίνακας ιδιοτιμών και  $\mathbf{V} = [\mathbf{q}_0 \ \mathbf{q}_1 \ \dots \ \mathbf{q}_{M-1}]$  τα ιδιοδιανύσματα του  $\hat{\mathbf{R}}_{uu}$

3) Εκτίμηση των λαμβανόμενων σημάτων  $\hat{\mathbf{D}}$  από την πολυπλοκότητα  $K$  της μικρότερης ιδιοτιμής  $\lambda_{\min}$

$$\hat{\mathbf{D}} = \mathbf{M} - \mathbf{K} \quad (4.20)$$

4) Υπολογισμός του φάσματος MUSIC

$$P_{MUSIC}(\varphi) = \frac{\mathbf{a}^H(\varphi) \mathbf{a}(\varphi)}{\mathbf{a}^H(\varphi) \mathbf{V}_n \mathbf{V}_n^H \mathbf{a}(\varphi)} \quad (4.21)$$

όπου  $\mathbf{V}_n = [\mathbf{q}_D \ \mathbf{q}_{D+1} \ \dots \ \mathbf{q}_{M-1}]$ .

5) Υπολογισμός των  $\hat{D} = M - K$  μεγίστων του φάσματος και εξαγωγή των γωνιών άφιξης.

#### 4.3 Εκτίμηση γωνιών άφιξης με κεραιοσύστημα επιλογής δέσμης ενεργών και παρασιτικών στοιχείων

Σε συνέχεια των παραπάνω, έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι εκτίμησης γωνιών άφιξης για ευφυή κεραιοσυστήματα επιλογής δέσμης με ενεργά και παρασιτικά στοιχεία. [8],[10]. Τα συστήματα αυτά, τόσο τα επίπεδα όσο και τα κυκλικά, είναι κατάλληλα για τη διαμόρφωση ηλεκτρονικά στρεφόμενης δέσμης [15-20]. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο με κατάλληλη επιλογή στο σύστημα τροφοδότησης των στοιχείων, τροποποιούνται οι ρευματικές κατανομές και προκύπτει ένα μοναδικό διάγραμμα ακτινοβολίας για το κεραιοσύστημα. Ο χρόνος εναλλαγή μεταξύ των διαγραμμάτων εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα μεταγωγής των RF διακοπών.

Κάποιες από τις μεθόδους εκτίμησης που εφαρμόζονται στα εν λόγω κεραιοσυστήματα βασίζονται στον υπολογισμό της λαμβανόμενης ισχύος από όλους τους δυνατούς συνδυασμούς τροφοδότησης που οδηγούν σε διαφορετικά διαγράμματα ακτινοβολίας [21-22]. Η γωνιακή κατεύθυνση της πηγής του σήματος μπορεί να προσδιοριστεί από το μέγεθος και τη σχετική ισχύ των λαμβανόμενων σημάτων. Στις περιπτώσεις όπου παρουσιάζονται πολλαπλά σημεία εκπομπής, ο αλγόριθμος φαίνεται να δίνει ανεπαρκή αποτελέσματα.

Στις ακόλουθες παραγράφους θα περιγραφούν δύο μέθοδοι εκτίμησης γωνιών άφιξης σημάτων. Η πρώτη, επί της ουσίας, εφαρμόζει με μικρή παραλλαγή τον αλγόριθμο MUSIC για κεραιοσυστήματα επιλογής δέσμης ενεργών - παρασιτικών στοιχείων. Η μεγάλη αλλαγή εντοπίζεται στον πίνακα στροφής, ο οποίος στην περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στον πίνακα τάσεων για κάθε διάγραμμα ακτινοβολίας του κεραιοσυστήματος. Η μέθοδος συνδυάζει την ικανότητα υψηλής ανάλυσης του MUSIC και τη δυνατότητα δειγματοληψίας του λαμβανόμενου σήματος με διαφορετικά διαγράμματα ακτινοβολίας που παρέχει η κεραία. Η άλλη μέθοδος αναλύει τα δύο δυνατότερα σήματα σε ένα ευρυζωνικό πολυδιαδρομικό περιβάλλον και τη σχετική ισχύ τους, θεωρώντας ένα κεραιοσύστημα ενεργών – παρασιτικών στοιχείων και ανάλυση με τη βοήθεια γενετικών αλγόριθμων. Με το μοντέλο αυτό,

επικεντρώνεται η ανάλυση στα δύο πιο δυνατά σήματα, από τις αντίστοιχες κατευθύνσεις, και θεωρεί το σύνολο των υπολοίπων σημάτων ως θόρυβο. Είναι βασισμένη στη διαμόρφωση δέσμης και ηλεκτρονική στροφή δέσμης ενώ στοχεύει κυρίως σε εφαρμογές με μικρή κινητικότητα των χρηστών όπως WLAN κλπ.

#### *4.3.1 Μέθοδος εκτίμησης γωνιών άφιξης με κεραιοσύστημα επιλογής δέσμης στοιχείων βασισμένη στον αλγόριθμο MUSIC*

Με την ακόλουθη μέθοδο, είναι δυνατόν να εκτιμηθούν οι γωνίες άφιξης δύο ευρυζωνικών σημάτων (το επιθυμητό σήμα και το δυνατότερο σήμα λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης) και η σχετική ισχύς τους ακόμη και αν η γωνιακή διαφορά είναι πολύ μικρή. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη βοήθεια των γενετικών αλγόριθμων που εμφανίζονται εξαιρετικά χρήσιμοι για εφαρμογές όπου οι χρήστες κινούνται με μικρή ταχύτητα (π.χ. WLAN) [23]. Σε αυτή την περίπτωση ένας σημαντικός παράγοντας είναι η περίοδος εκπαίδευσης του κεραιοσυστήματος στο σταθμό βάσης. Σε ένα πολυδιαδρομικό περιβάλλον, μια σύντομη χρονική περίοδος πρέπει να αφιερωθεί στην εκτίμηση γωνιών άφιξης των ισχυρότερων διαδρομών και στον καθορισμό της σχετικής ισχύος των λαμβανόμενων σημάτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος ανήκει στην κατηγορία των τεχνικών συμβατικής διαμόρφωσης δέσμης. Δεν λαμβάνονται λοιπόν υπόψη, η φύση του λαμβανόμενου σήματος ούτε η στατιστική ανάλυση του επιθυμητού σήματος και του θορύβου [9].

Η μέθοδος που θα αναλυθεί παρακάτω βασίζεται στη φιλοσοφία του αλγόριθμου MUSIC και μπορεί να εφαρμοστεί σε κεραιοσυστήματα επιλογής δέσμης με ενεργά και παρασιτικά στοιχεία. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και αναλύεται στο [12], συνδυάζει τη δυνατότητα υψηλής ανάλυσης που προσφέρει ο MUSIC και τα σημαντικά πλεονεκτήματα των εν λόγω κεραιοσυστημάτων σε ότι αφορά τη δειγματοληψία του λαμβανόμενου σήματος με διαφορετικά διαγράμματα ακτινοβολίας. Το τελευταίο χαρακτηριστικό είναι εφικτό, μόνο στην περίπτωση που οι RF διακόπτες που ελέγχουν τη ροή των ρευμάτων, είναι αρκετά γρήγοροι (συνήθως απαιτείται μεταγωγή με χρονική διάρκεια της τάξης των μερικών nanoseconds).

Ο MUSIC (MULTiple Signal Classification), είναι αλγόριθμος εκτίμησης παραμέτρων σήματος και βασίζεται στη δομή των πινάκων. Παρέχει πληροφορίες σχετικά με το πλήθος των οδεύσεων των σημάτων, DoA για την κάθε οδευση,

σχετική ισχύ και ετεροσυσχέτιση μεταξύ των σημάτων [6],[34]. Υποθέτοντας ότι  $D$  σήματα προσπίπτουν σε ένα κεραιοσύστημα  $M$ -στοιχείων, το λαμβανόμενο διάνυσμα  $\mathbf{u}(t)$  μπορεί να εκφραστεί ως γραμμικός συνδυασμός  $D$  σημάτων και θορύβου:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{A}s(t) + \mathbf{n}(t) \quad (4.22)$$

όπου  $\mathbf{A}$  πίνακας διαστάσεων  $M \times D$  που περιέχει τα διανύσματα στροφής  $\mathbf{a}(\varphi_j)$  και αντιστοιχίζονται στις γωνίες άφιξης (DoA's) των σημάτων που προσπίπτουν ( $j=0,1 \dots, D-1$ ). Επιπρόσθετα

$\mathbf{s}^T(t) = [s_0(t) \ s_1(t) \ \dots \ s_{D-1}(t)]$  το διάνυσμα του σήματος εισόδου

$\mathbf{n}(t) = [n_0(t) \ n_1(t) \ \dots \ n_{D-1}(t)]$  το διάνυσμα του θορύβου

Στην τροποποιημένη μορφή του αλγόριθμου, η καινοτομία έγκειται στα στοιχεία που αποτελούν τον πίνακα  $\mathbf{A}$ . Για κεραιοσύστημα επιλογής δέσμης με  $N_{RP}$  συνολικά διαγράμματα ακτινοβολίας, η εξίσωση (4.22) ισχύει, αλλά τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{A}$  είναι πλέον οι απολαβές που προκύπτουν από τα διαγράμματα ακτινοβολίας για τις γωνίες άφιξης των λαμβανόμενων σημάτων. Είναι λοιπόν

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} g_1(\phi_0) & g_1(\phi_1) & \dots & g_1(\phi_{D-1}) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ g_{N_{RP}}(\phi_0) & g_{N_{RP}}(\phi_1) & \dots & g_{N_{RP}}(\phi_{D-1}) \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

όπου  $g_k(\phi) \ k=1,2,\dots, N_{RP}$  τα αζιμουθιακά διαγράμματα ακτινοβολίας.

Λαμβάνονται υπόψη το νέο πίνακα, ο τροποποιημένος αλγόριθμος MUSIC ακολουθεί τα παρακάτω βήματα :

1) Εκτίμηση του πίνακα αυτοσυσχέτισης εισόδου  $\mathbf{R}_{uu}$  από  $N_s$  δείγματα. Σε αυτή την περίπτωση το διάνυσμα εισόδου  $\mathbf{u}(t)$  εκφράζει το συνολικό λαμβανόμενο επίπεδο σήματος και θορύβου για κάθε ένα από τα  $N_{RP}$  διαγράμματα ακτινοβολίας. Υποθέτοντας ότι τα λαμβανόμενα σήματα είναι ασυσχέτιστα μεταξύ τους αλλά και με το θόρυβο, τότε

$$\mathbf{R}_{uu} = E[\mathbf{u}\mathbf{u}^H] = \mathbf{A}E[\mathbf{b}\mathbf{b}^H]\mathbf{A}^H + E[\mathbf{n}\mathbf{n}^H] = \mathbf{A}\mathbf{R}_{bb}\mathbf{A}^H + \sigma_n^2\mathbf{I} \quad (4.24)$$

Όπου  $\mathbf{R}_{bb}$  ο πίνακας συσχέτισης σημάτων και  $\sigma_n^2$  η μεταβλητότητα του θορύβου.

2) Ανάλυση του  $\hat{\mathbf{R}}_{uu}$

$$\hat{\mathbf{R}}_{uu} \mathbf{V} = \mathbf{V}\mathbf{A} \quad (4.25)$$

με  $\mathbf{A} = \text{diag}\{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{N_{RP}-1}\}$ ,  $\lambda_0 \geq \lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_{N_{RP}-1}$  ο πίνακας ιδιοτιμών και  $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1 \ \dots \ \mathbf{v}_{N_{RP}}]$  τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα του  $\hat{\mathbf{R}}_{uu}$ . Η ακρίβεια της εκτίμησης του πίνακα συσχέτισης εξαρτάται από το πλήθος των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν

$$\hat{\mathbf{R}}_{uu} = \frac{1}{N_s} \sum_{n_s=1}^{N_s} \mathbf{u}_{n_s} \mathbf{u}_{n_s}^H \quad (4.26)$$

3) Εκτίμηση των λαμβανόμενων σημάτων  $\hat{D}$  από την πολυπλοκότητα  $K$  της μικρότερης ιδιοτιμής  $\lambda_{\min}$

$$\hat{D} = N_{RP} - K \quad (4.27)$$

Πρακτικά, εφόσον το μέγεθος  $\hat{\mathbf{R}}_{uu}$  εκτιμάται από πεπερασμένο πλήθος δειγμάτων  $N_s$ , οι  $K$  μικρότερες ιδιοτιμές δεν είναι ίσες μεταξύ τους αλλά περίπου ίσες. Για την εξακρίβωση της σύγκλισης των τιμών αυτών, εφαρμόζεται το κριτήριο Rissanen

Minimum Descriptive Length (MDL). Με την MDL προσέγγιση, το πλήθος των σημάτων καθορίζεται ως η τιμή εκείνη που ελαχιστοποιεί την ακόλουθη σχέση

$$\text{MDL}(\hat{D}) = -\log \left\{ \frac{\prod_{i=\hat{D}+1}^{N_{RP}} \lambda_i^{(N_{RP}-\hat{D})}}{1} \right\}^{(N_{RP}-\hat{D})N_s} + \frac{1}{2} \hat{D} (2N_{RP} - \hat{D}) \log N_s \quad (4.28)$$

όπου  $\hat{D} \in \{0, 1, \dots, N_{RP} - 1\}$ .

#### 4) Υπολογισμός του φάσματος MUSIC

$$P_{MUSIC}(\phi) = \frac{\mathbf{a}^H(\phi) \mathbf{a}(\phi)}{\mathbf{a}^H(\phi) \mathbf{V}_n \mathbf{V}_n^H \mathbf{a}(\phi)} \quad (4.29)$$

όπου  $\mathbf{a}(\phi) = [g_1(\phi) \ g_2(\phi) \ \dots \ g_{N_{RP}}(\phi)]^T$  και  $\mathbf{V}_n = [\mathbf{v}_{\hat{D}+1} \ \dots \ \mathbf{v}_{N_{RP}}]$ .

5) Υπολογισμός των γωνιών άφιξης από τα  $\hat{D}$  μέγιστα που παρουσιάζονται στο φάσμα MUSIC.

#### 4.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τη μέθοδος εκτίμησης γωνιών άφιξης με κεραιοσύστημα επιλογής δέσμης στοιχείων βασισμένη στον αλγόριθμο MUSIC

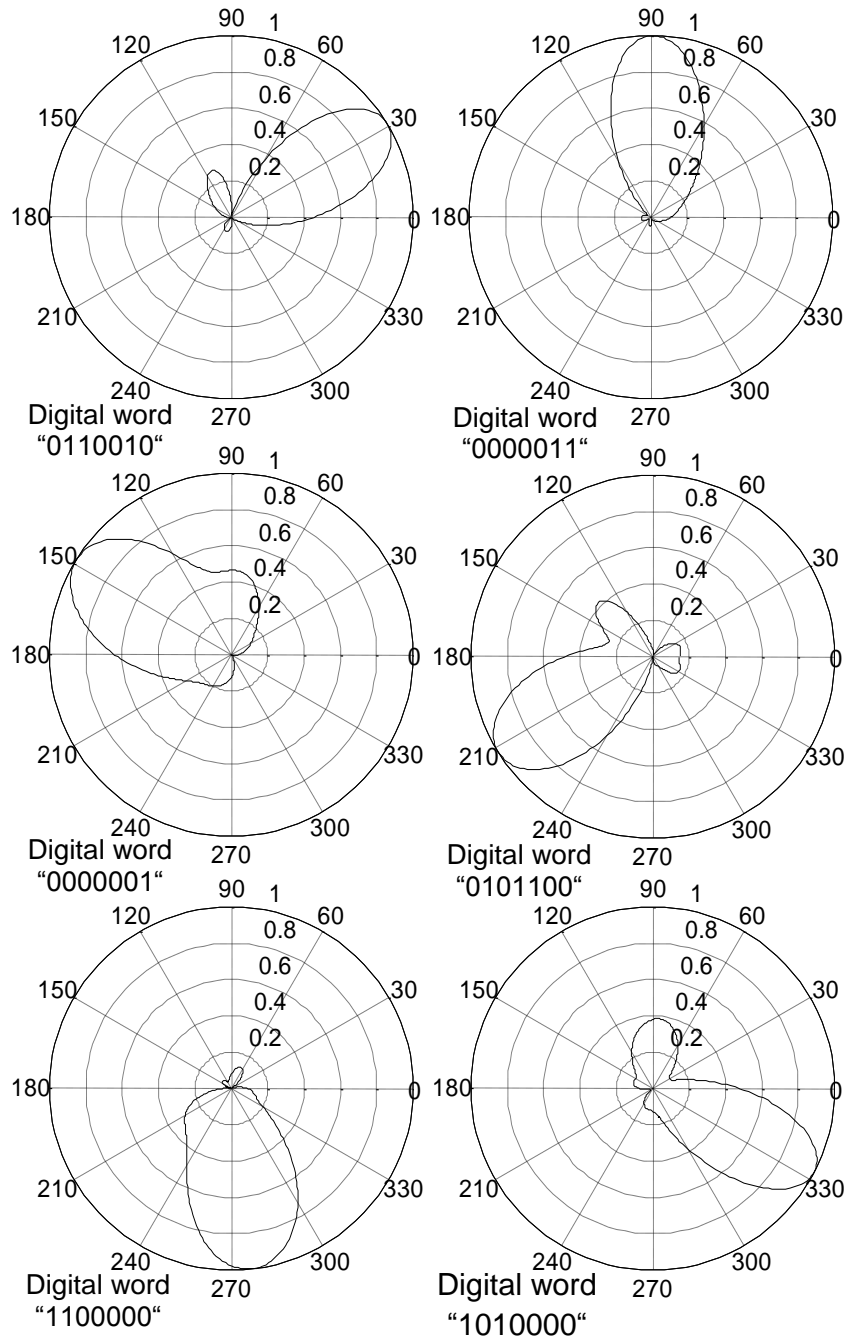
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που παρουσιάζονται παρακάτω επιβεβαιώνουν την υψηλή ανάλυση του τροποποιημένου MUSIC αλγόριθμου. Ειδικότερα:

- 500 Monte-Carlo (MC) προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για κάθε τύπο κεραίας.
- Κάθε προσομοίωση στόχευε στην ανάλυση δύο εισερχομένων σημάτων, με μέση τιμή ισχύος από 0 έως 7dB και γωνίες άφιξης που ακολουθούσαν κανονική ή κάποια άλλη κατανομή. Το διάνυσμα σημάτων εισόδου  $\mathbf{s}$  (εξίσωση 4.22) θεωρήθηκε προσωρινά λευκό και κυκλικά Gaussian διανεμημένο, το οποίο αντιστοιχεί σε  $s(t) \in N(0, \mathbf{R}_{bb})$ .
- Χωρικά, προσωρινά λευκός και κυκλικά Gaussian διανεμημένος θεωρήθηκε και ο θόρυβος με σχετική μέση τιμή ισχύος  $s_r$  από -10 έως -20dB, σε σύγκριση με το πιο αδύνατο λαμβανόμενο σήμα.
- Κάθε προσομοίωση πραγματοποιήθηκε θεωρώντας τέσσερα σετ δειγμάτων εισόδου  $N_s$  (πχ 500, 1000, 1500 και 2000 δείγματα).

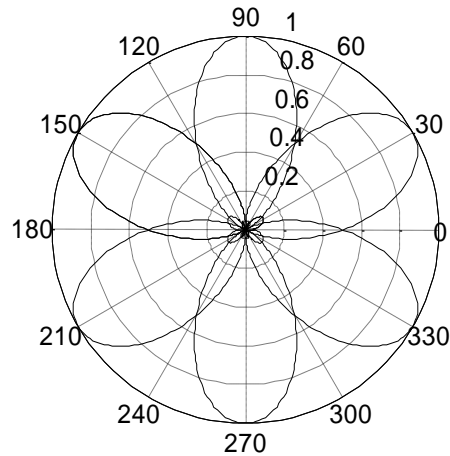
Για τις προσομοιώσεις θεωρήθηκαν δύο κεραιοσυστήματα: μια κεραία Switched Parasitic Planar Array 7 στοιχείων και μια κεραία Switched Parasitic Circular Array 6 στοιχείων. Τα δυο αυτά κεραιοσυστήματα καλύπτουν ακτινοβολία 360 μοιρών με 6 διαφορετικά διαγράμματα ( $N_{RP}=6$ ) όπως φαίνεται από τα σχήματα 4.1 και 4.2. Το σχήμα 4.3 παρουσιάζει τη δυνατότητα ανάλυσης της μεθόδου θεωρώντας.. Οι γωνίες άφιξης θεωρήθηκαν ότι ακολουθούν κανονική κατανομή  $(0,2\pi)$  και η πιθανότητα  $P_{\text{success}}$  δηλώνει το πλήθος των περιπτώσεων  $N_{\text{success}}$  όπου και οι δύο γωνίες άφιξης των ισχυρών σημάτων εκτιμήθηκαν με μια απόκλιση  $\pm 10^\circ$

( $P_{\text{success}} = \frac{N_{\text{success}}}{N_s}$ ) σε σχέση με τις πραγματικές.

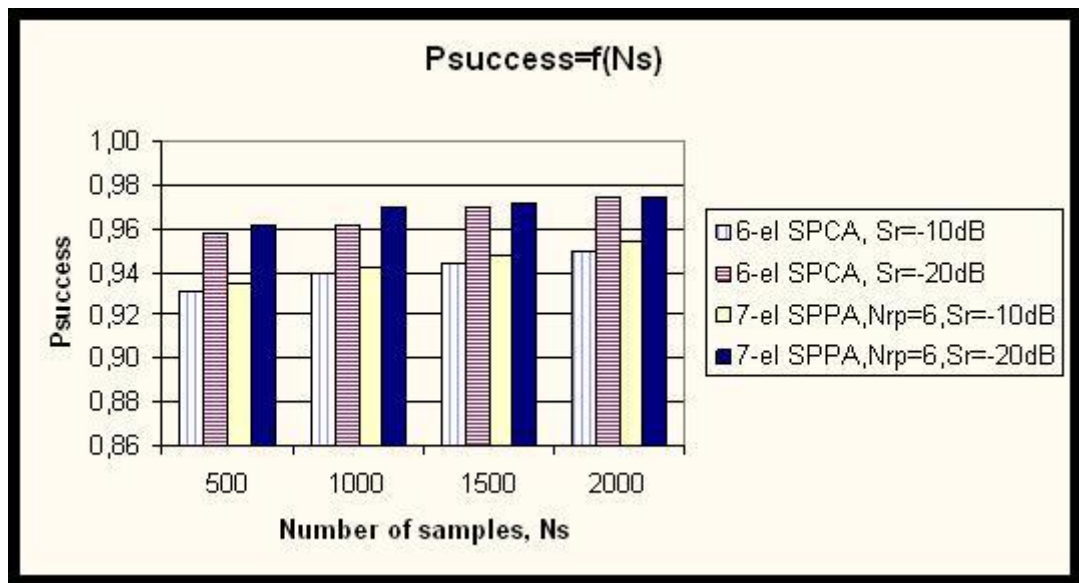




Σχήμα 4.1 Διαγράμματα κεραίας Switched Parasitic Planar Array 7 στοιχείων



Σχήμα 4.2 Διαγράμματα κεραίας Switched Parasitic Circular Array 6 στοιχείων

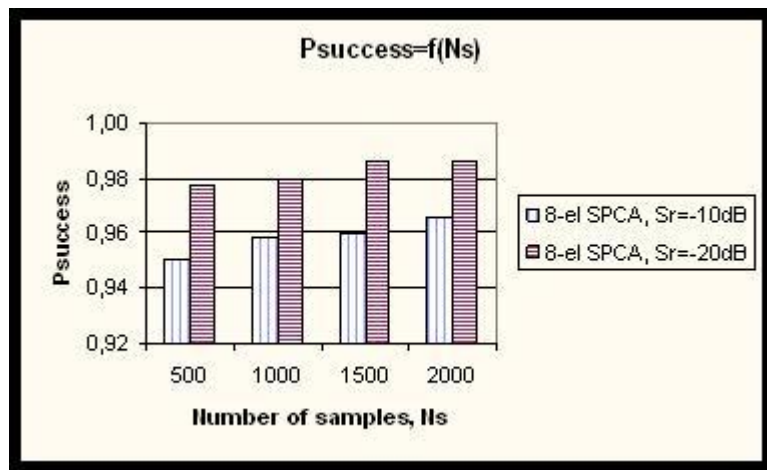
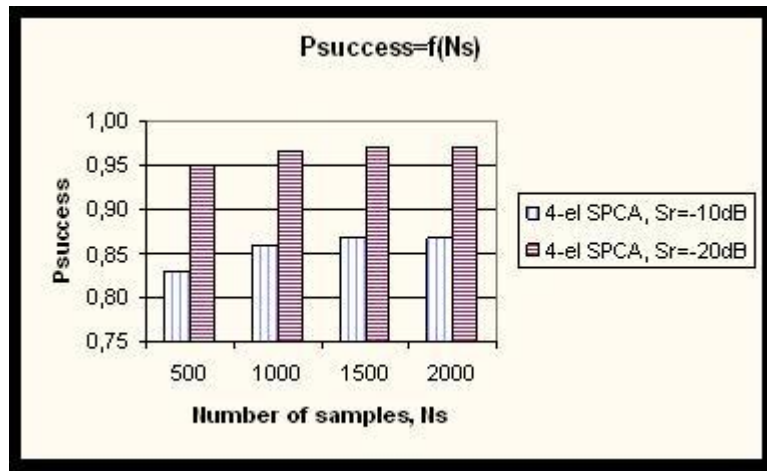


Σχήμα 4.3 Δυνατότητα ανάλυσης της μεθόδου θεωρώντας κεραία Switched Parasitic Planar Array 7 στοιχείων και κεραία Switched Parasitic Circular Array 6 στοιχείων

Κάποια γενικά σχόλια που μπορούν να γίνουν:

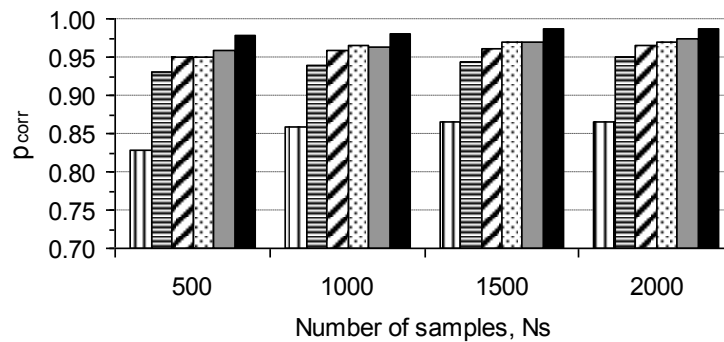
- ❖ Η κεραία 7 στοιχείων παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα για ίδιο επίπεδο θορύβου.
- ❖ Μειώνοντας το  $s_r$  και αυξάνοντας τα δείγματα  $N_s$ , η  $P_{\text{success}}$  ασυμπτωτικά αγγίζει τη μονάδα.

- ❖ Αυξάνοντας το πλήθος των διαγραμμάτων ακτινοβολίας για κάλυψη 360°, αυξάνεται η πιθανότητα επιτυχίας (Σχήματα 4.4, 4.5)



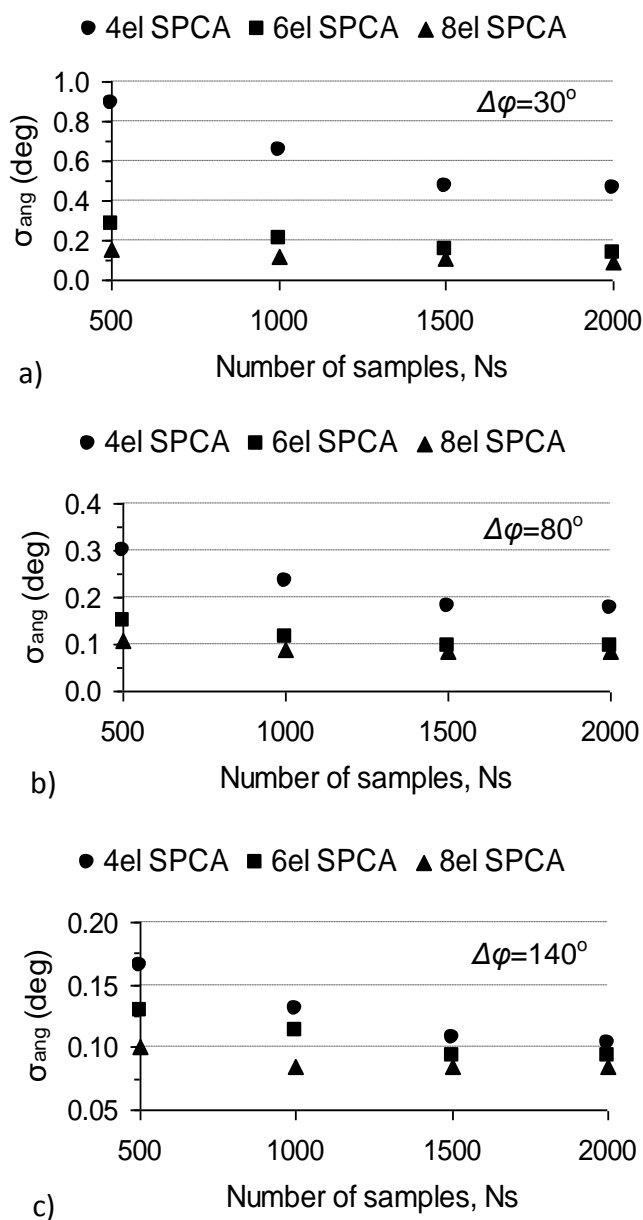
Σχήμα 4.4 Αποτελέσματα για κεραιοσύστημα SPCA 4 και 8 στοιχείων

□ 4el SPCA,  $S_n=-10dB$    ▨ 6el SPCA,  $S_n=-10dB$    ▩ 8el SPCA,  $S_n=-10dB$   
 □ 4el SPCA,  $S_n=-20dB$    ▧ 6el SPCA,  $S_n=-20dB$    ▩ 8el SPCA,  $S_n=-20dB$



Σχήμα 4.5 Συγκριτικά αποτελέσματα για κεραιοσύστημα SPCA 4, 6 και 8 στοιχείων

Στο παρακάτω σχήμα 4.6 φαίνεται η σχέση  $\sigma_{ang}$  ως προς  $N_s$  για 100 MC προσομοιώσεις ( $p_{corr} = 1$ ), για τρεις τύπους κεραιοσυστημάτων SPCA,  $s_n = -10\text{dB}$  και  $\Delta\phi = 30^\circ$ ,  $\phi_1 = 10^\circ, \phi_2 = 40^\circ$ ,  $\Delta\phi = 80^\circ$ ,  $\phi_1 = 40^\circ, \phi_2 = 120^\circ$  και  $\Delta\phi = 140^\circ$ ,  $\phi_1 = 20^\circ, \phi_2 = 160^\circ$ .



Σχήμα 4.6 Σχέση  $\sigma_{ang}$  ως προς  $N_s$  για SPCA 4,6 και 8 στοιχείων και διάφορα  $\Delta\phi$

#### 4.3.3 Μέθοδος εκτίμησης γωνιών άφιξης για δύο διαδρομών μοντέλο, ευρυζωνικό περιβάλλον διάδοσης και κεραιοσύστημα ενεργών – παρασιτικών στοιχείων

Η μέθοδος αυτή παρέχει πληροφορία σχετικά με τη γωνία άφιξης και τη σχετική ισχύ των δύο ισχυρότερων σημάτων σε ένα ευρυζωνικό πολυδιαδρομικό περιβάλλον διάδοσης θεωρώντας κεραιοσύστημα ενεργών – παρασιτικών στοιχείων και χρησιμοποίηση γενετικού αλγόριθμου. Σήματα που λαμβάνονται από κατευθύνσεις πέρα των δύο ισχυρότερων, ενσωματώνονται στο μοντέλο ως θόρυβος.

Στην ευρυζωνική μετάδοση σημάτων, το ιδεατό εκπεμπόμενο σήμα με άπειρο εύρος είναι η ωστική διέγερση (impulse response). Σε ένα πολυδιαδρομικό περιβάλλον, η εκπομπή του  $\delta(t)$  λαμβάνεται στο δέκτη ως σύνολο πλήθους διεγέρσεων με διαφορετικά πλάτη και φάσεις [24]

$$h(\tau, t) = \sum_{i=1}^L \beta_i e^{jq_i} \delta(t - \tau_i) \quad (4.30)$$

όπου  $\beta_i$  και  $q_i$  το πλάτος και η φάση αντίστοιχα του σήματος από την  $i$  διαδρομή με καθυστέρηση  $\tau_i$ . Θεωρώντας ιδανική διάδοση οι διαδρομές είναι απομονωμένες και ανεξάρτητες μεταξύ τους και επομένως η λαμβανόμενη ισχύς μπορεί να εκφραστεί ως [24]

$$P_r = \sum_{i=1}^L |\beta_i|^2 \quad (4.31)$$

Άρα, η λαμβανόμενη ισχύς είναι το σύνολο των τετραγώνων του πλάτους από όλες τις διαδρομές. Η θεώρηση αυτή είναι σωστή όταν οι εκπεμπόμενοι παλμοί είναι πολύ μικρής διάρκειας.

Η ανάλυση έχει βασιστεί σε ένα κεραιοσύστημα ενεργών – παρασιτικών  $N$  στοιχείων που προσφέρει  $N_{RP}$  διαφορετικά διαγράμματα ακτινοβολίας. Δεδομένης της δυνατότητας ελέγχου των διαγραμμάτων με τις ψηφιακές κωδικολέξεις, η συνολική λαμβανόμενη ισχύς για κάθε διάγραμμα είναι δυνατόν να καταγραφεί διαδοχικά. Από την πληροφορία αυτή ο στόχος είναι να καθοριστούν τα πλάτη  $s_1, s_2$

των δύο ισχυρότερων εισερχομένων σημάτων και οι αντίστοιχες γωνίες εισόδου  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ .

Η λαμβανόμενη ισχύς για  $P_i$  για την  $i$  ψηφιακή κωδικολέξη και επομένως το  $i$  διάγραμμα ακτινοβολίας μπορεί να εκφραστεί, λαμβάνοντας υπόψη και την 4.31, ως:

$$P_1 = s_1 G_1(\phi_1) + s_2 G_1(\phi_2) \quad (4.32\alpha)$$

$$P_2 = s_1 G_2(\phi_1) + s_2 G_2(\phi_2) \quad (4.32\beta)$$

$$P_i = s_1 G_i(\phi_1) + s_2 G_i(\phi_2) \quad , \quad i=3, \dots, N_{RP} - 1 \quad (4.32\gamma)$$

$$P_{N_{RP}} = s_1 G_{N_{RP}}(\phi_1) + s_2 G_{N_{RP}}(\phi_2) \quad (4.32\delta)$$

όπου  $G_i(\phi_1)$  και  $G_i(\phi_2)$  τα κέρδη στις γωνίες  $\phi_1$  και  $\phi_2$ , αντίστοιχα για το  $i$  διάγραμμα ακτινοβολίας.

Η εκτίμηση για τη γωνία άφιξης και τη σχετική ισχύ των δύο ισχυρότερων σημάτων είναι βασισμένη σε τεχνική βελτιστοποίησης με χρήση γενετικού αλγόριθμου. Στην περίπτωση αυτή, κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού αντιστοιχίζεται σε πιθανές τιμές γωνιών άφιξης των δύο ισχυρών σημάτων  $\hat{\phi}_1$ ,  $\hat{\phi}_2$ . Χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές στις εξισώσεις 4.32α, 4.32β και επιλύοντας ως προς  $s_1$ ,  $s_2$ , μπορεί να υπάρξει μια πρώτη εκτίμηση για την λαμβανόμενη ισχύ των δύο εν λόγω σημάτων. Αναλυτικότερα, εφόσον η συνολικά λαμβανόμενη ισχύς  $P_1$ ,  $P_2$ , για τα διαγράμματα ακτινοβολίας 1, 2, έχει καταμετρηθεί και είναι γνωστή, το κέρδος της κεραίας  $G_i(\phi)$  είναι επίσης γνωστό για όλα τα διαγράμματα, γίνεται εκτίμηση για την επιμέρους ισχύ των σημάτων  $\hat{s}_1$  και  $\hat{s}_2$ . Στο επόμενο βήμα γίνεται εκτίμηση των υπολοίπων  $N_{RP} - 2$  συνολικά λαμβανόμενων ισχύων χρησιμοποιώντας τις τιμές  $\hat{s}_1$ ,  $\hat{s}_2$  και  $\hat{\phi}_1$ ,  $\hat{\phi}_2$ :

$$\hat{P}_i = \hat{s}_1 G_i(\hat{\phi}_1) + \hat{s}_2 G_i(\hat{\phi}_2) \quad , \quad i=3, \dots, N_{RP} \quad (4.33)$$

Επομένως όταν κάποιο από τα  $\hat{P}_i$  γίνει ίσο με το μετρούμενο  $P_i$  ( $i=3, \dots, N_{RP}$ ), οι τιμές  $\hat{s}_1$ ,  $\hat{s}_2$  και  $\hat{\phi}_1$ ,  $\hat{\phi}_2$ , αποτελούν τη λύση του προβλήματος. Με βάση όλα τα παραπάνω η κατάλληλη αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$of = \frac{1}{1 + \sqrt{e}} \quad (4.34)$$

όπου

$$e = \frac{1}{N_{RP} - 2} \sum_{i=3}^{N_{RP}} \left\{ \frac{P_i - \hat{P}_i}{P_i} \right\}^2 \quad (4.35)$$

Οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης κανονικοποιούνται από 0 έως 1.

Συνοπτικά η μέθοδος ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- 1) Διαδοχική καταγραφή της συνολικά λαμβανόμενης ισχύος για κάθε πιθανό διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας:

$$P_i = s_1 G_i(\phi_1) + s_2 G_i(\phi_2) \quad , \quad i=1, \dots, N_{RP}$$

- 2) Έναρξη του γενετικού αλγόριθμου
- 3)  $k$  χρωμόσωμα: εκτίμηση  $\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2$  από το γενετικό

- 4) Υπολογισμός  $\hat{s}_1 = \frac{\begin{vmatrix} P_1 & G_1(\hat{\phi}_2) \\ P_2 & G_2(\hat{\phi}_2) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} G_1(\hat{\phi}_1) & G_1(\hat{\phi}_2) \\ G_2(\hat{\phi}_1) & G_2(\hat{\phi}_2) \end{vmatrix}}$  ,  $\hat{s}_2 = \frac{\begin{vmatrix} G_1(\hat{\phi}_1) & P_1 \\ G_2(\hat{\phi}_1) & P_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} G_1(\hat{\phi}_1) & G_1(\hat{\phi}_2) \\ G_2(\hat{\phi}_1) & G_2(\hat{\phi}_2) \end{vmatrix}}$

- 5) Υπολογισμός  $\hat{P}_i = \hat{s}_1 G_i(\hat{\phi}_1) + \hat{s}_2 G_i(\hat{\phi}_2) \quad , \quad i=3, \dots, N_{RP}$

- 6) Υπολογισμός  $e = \frac{1}{N_{RP} - 2} \sum_{i=3}^{N_{RP}} \left\{ \frac{P_i - \hat{P}_i}{P_i} \right\}^2$

- 7) Υπολογισμός  $of = \frac{1}{1 + \sqrt{e}}$

- 8)  $k=k+1$ , επόμενες τιμές και επανάληψη των βημάτων 3-7

#### 4.3.4 Αποτελέσματα μεθόδου εκτίμησης γωνιών άφιξης για δύο διαδρομών μοντέλο, ευρυζωνικό περιβάλλον διάδοσης και κεραιοσύστημα ενεργών – παρασιτικών στοιχείων

Τα παρακάτω αποτελέσματα αναδεικνύουν την αξιοπιστία της συγκεκριμένης μεθόδου. Πιο συγκεκριμένα:

- 500 Monte-Carlo (MC) προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για κάθε τύπο κεραίας.
- Κάθε προσομοίωση στόχευε στην ανάλυση δύο εισερχομένων σημάτων, με μέση τιμή ισχύος από 0 έως 7dB και γωνίες άφιξης που ακολουθούσαν κανονική ή κάποια άλλη κατανομή.
- Ο γενετικός αλγόριθμος δομήθηκε με 400 γενιές των 50 χρωμοσωμάτων η κάθε μία,  $p_{crossover}=0.8$ , και  $p_{mutation}=0.1$ . Οι υπόλοιπες παράμετροι: roulette wheel selection, simple crossover και binary mutation.
- Τα λαμβανόμενα σήματα από κατευθύνσεις διαφορετικές αυτών του ενδιαφέροντος, θεωρήθηκαν θόρυβος με μέση συνολική ισχύ ίση με -20dB ή -50dB, συγκρινόμενη με το ασθενέστερο σήμα. Αυτό επιτεύχθηκε εισάγοντας έναν επιπλέον παράγοντα θορύβου στις εξισώσεις 4.32γ-4.32δ.

Antenna type	$S_r$ (dB)	$P_{corr}$	$\sigma_{ang}$ ( $^{\circ}$ )	$\sigma_{str}$	$P_{beam}$
7-el SPA, $N_{RP}=6$	-50	0.886	0.621	0.027	0.952
	-20	0.686	1.890	0.057	0.838
6-el SPCA, $N_{RP}=6$	-50	0.918	0.364	0.026	0.940
	-20	0.534	1.650	0.073	0.740

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα για κεραιοσύστημα SPPA 7 στοιχείων και SPCA 6 στοιχείων, 6 διαγραμμάτων και γωνίες κύριων σημάτων στην ίδια δέσμη

Στον παραπάνω πίνακα 4.1 φαίνεται η δυναμική της μεθόδου για ένα κεραιοσύστημα ενεργών – παρασιτικών SPPA 7 στοιχείων και SPCA 6 στοιχείων με 6 διαγράμματα ακτινοβολίας ( $N_{RP}=6$ ). Οι γωνίες άφιξης θεωρήθηκαν ομοιόμορφα κατανομημένες ( $0,2\pi$ ). Η πιθανότητα  $P_{success}$  δηλώνει το πλήθος των περιπτώσεων,  $N_{success}$ , στις οποίες τόσο οι ισχύς των σημάτων όσο και οι γωνίες άφιξης εκτιμήθηκαν με μια μέγιστη απόκλιση ισχύος  $\pm 0,2$  (για  $s_2=1$  και  $s_1$  ομοιόμορφα διανεμημένο από



1 έως 5) και γωνίας  $\pm 10^\circ$ , αντίστοιχα ( $P_{\text{success}} = \frac{N_{\text{success}}}{N_s}$ ). Επιπρόσθετα,  $P_{\text{rightbeam}}$  δηλώνει το πλήθος των περιπτώσεων,  $N_{\text{rightbeam}}$ , όπου οι δέσμες λήψης εκτιμήθηκαν σωστά ( $P_{\text{rightbeam}} = \frac{N_{\text{rightbeam}}}{N_s}$ ). Να σημειωθεί επίσης ότι  $s_r$  δηλώνει τη συνολική μέση ισχύ των λαμβανόμενων σημάτων από κατευθύνσεις εκτός των δύο κύριων. Επιπλέον,  $\sigma_{\text{ang}}$  και  $\sigma_{\text{str}}$ , όπως παρακάτω:

$$\sigma_{\text{ang}} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{success}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{success}}} 0.5 \left( (\phi_{i1} - \hat{\phi}_{i1})^2 + (\phi_{i2} - \hat{\phi}_{i2})^2 \right)} \quad (4.36\alpha)$$

$$\sigma_{\text{str}} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{success}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{success}}} 0.5 \left( (s_{i1} - \hat{s}_{i1})^2 + (s_{i2} - \hat{s}_{i2})^2 \right)} \quad (4.36\beta)$$

DoA distribution	$s_r$ (dB)	$P_{\text{corr}}$	$\sigma_{\text{ang}}$ ( $^\circ$ )	$\sigma_{\text{str}}$	$P_{\text{beam}}$
Different beams	-50	0.918	0.797	0.019	0.958
	-20	0.822	1.866	0.057	0.950
GBSBEM ( $n=2$ )	-50	0.864	0.593	0.040	0.878
GBSBEM ( $n=4$ )	-50	0.852	0.623	0.040	0.842

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα για κεραιοσύστημα 7 στοιχείων, 6 διαγραμμάτων και γωνίες κύριων σημάτων σε διαφορετικές δέσμες

Στον πίνακα 4.2 φαίνονται τα αποτελέσματα για το κεραιοσύστημα SP7A 7 στοιχείων θεωρώντας ότι τα δύο ισχυρότερα σήματα λαμβάνονται από δύο

διαφορετικές δέσμες ή ότι οι γωνίες άφιξης ακολουθούν κατανομή με βάση το μοντέλο Geometrically Based Single Bounce Elliptical Model (GBSBEM) [9]:

$$f_{\phi}(\phi) = \frac{1}{2\pi\beta} \frac{(r_m^2 - 1)^2}{(r_m - \cos\phi)^2} \quad (4.37)$$

όπου  $\beta = r_m \sqrt{r_m^2 - 1}$  και  $r_m = 10^{(T-L_r)/(10n)}$  είναι η μέγιστη κανονικοποιημένη χρονοκαθυστέρηση. Η ισχύς του εισερχόμενου σήματος θεωρείται  $T = 7\text{dB}$ , ενώ οι απώλειες λόγω ανάκλασης  $L_r = 6\text{dB}$  και ο εκθετικός συντελεστής  $n$  ίσος με 2 ή 4.

Τέλος εξετάστηκε η επίδραση επιπλέον διαγραμμάτων ακτινοβολίας στην επίδοση της μεθόδου. Στον παρακάτω πίνακα 4.3 φαίνονται τα αποτελέσματα όταν θεωρείται κεραιοσύστημα SPCA και αυξάνονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας. Καμία βελτίωση δεν παρατηρείται στο  $p_{corr}$  για  $N_{RP} > 8$ , ενώ οι καλύτερες τιμές για  $\sigma_{ang}$  και  $\sigma_{str}$  παρατηρούνται για  $N_{RP} = 6$ .

<i>Antenna type</i>	$p_{corr}$	$\sigma_{ang} (^{\circ})$	$\sigma_{str}$
4-el SPCA $N_{RP}=4$	0.470	1.021	0.036
6-el SPCA $N_{RP}=6$	0.918	0.364	0.026
8-el SPCA $N_{RP}=8$	0.934	0.681	0.033
10-el SPCA $N_{RP}=10$	0.884	0.679	0.034

Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα για κεραιοσύστημα SPCA 6 στοιχείων και διαφορετικό πλήθος διαγραμμάτων ακτινοβολίας

#### 4.4 Βιβλιογραφία

- 1 T. K. Sarkar, M. C. Wicks, M. Salazar-Palma, R. J. Bonneau, *Smart Antennas*, John Wiley and Sons, 2003
- 2 S. Belofiore, C. A. Balanis, J. Foutz, A. S. Spanias, "Smart antenna systems for mobile communication networks, Part 2 : Beamforming and Network Throughput", IEEE Antenna's and Propagation Magazine, pp 106-114, vol 44, no 4, August 2002

- 3 S. Chandran, *Advances in Direction-of-Arrival Estimation*, Artech House, 2006
- 4 F. Gross, *Smart antennas for wireless communications*, McGraw-Hill, 2005
- 5 P. K. Varlamos, S. A. Mitilneos, S. C. Panagiotou, A. I. Sotiriou, C. N. Capsalis, "Two different approaches to Direction-of-Arrival Estimation Using Switch Parasitic Planar Arrays", *Advances in Direction-of-Arrival Estimation*, ch 8, 2006
- 6 T. Svantesson, M. Wennström, "High-resolution direction finding using a switched parasitic antenna," *Proceedings of the 11th IEEE Signal Processing Workshop on Statistical Signal Processing*, pp. 508-511, 2001
- 7 A. H. El Zooghby, C. G. Christodoulou, M. Georgiopoulos, "A neural network-based smart antenna for multiple source tracking," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 48, No. 5, pp. 768-775, May 2000
- 8 A.-J. van der Veen, M. C. Vanderveen, A. Paulraj, "Joint angle and delay estimation using shift-invariance techniques," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 46, No. 2, pp. 405-418, February 1998
- 9 C.J. Liberti, T.S. Rappaport, *Smart Antennas for Wireless Communications : IS-95 and Third Generation CDMA Applications*, Prentice Hall, 1999
- 10 L. C. Godara, "Application of antenna arrays to mobile communications, Part 2: Beam-forming and direction-of arrival considerations," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, No. 8, pp. 1195-1245, August 1997
- 11 R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-34, No. 3, pp. 276-280, March 1986
- 12 J. Razavilar, F. Rashid-Farrokhi, K. J. Ray Liu, "Software Radio Architecture with Smart Antenas : A Tutorial on Algorithms and Complexity", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.17, no.4, April 1999
- 13 R. Kawitkar, D. Wakde, "An approach for MUSIC algorithm in smart antenna system", *IEEE International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials, IWAT 2005*, pp 403-406, 2005.
- 14 M Cheney, "The linear sampling method and the MUSIC algorithm", *Inverse Problems* 17, pp. 591-595, 2001
- 15 P. K. Varlamos and C. N. Capsalis, "Electronic beam steering using switched parasitic smart antenna arrays", *Progress in Electromagnetics Research, PIER* 36, pp. 101-109, 2002

- 16 P. K. Varlamos and C. N. Capsalis, "Design of a six-sector switched parasitic planar array using the method of genetic algorithms", *Wireless Personal Communications*, vol. 26, no. 1, pp. 77-88, August 2003
- 17 D. V. Thiel, S. G. O' Keefe, J. W. Lu, "Electronic beam steering in wire and patch antenna systems using switched parasitic elements," *Proceedings of the IEEE Antennas Propagat. Soc. URSI Radio Sci. Meet*, Baltimore, MD, pp. 534-537, July 1996
- 18 S. L. Preston, D. V. Thiel, J. W. Lu, S. G. O' Keefe, T. S. Bird, "Electronic beam steering using switched parasitic patch elements," *Electronics Letters*, Vol. 33, No. 1, pp. 7-8, 1997
- 19 N. L. Scott, M. O. Leonard-Taylor, R. G. Vaughan, "Diversity gain from a single-port adaptive antenna using switched parasitic elements illustrated with a wire and monopole prototype," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 47, No. 6, pp. 1066-1070, June 1999
- 20 R. Schlub, D. V. Thiel, J. W. Lu, S. G. O' Keefe, "Dual-band six-element switched parasitic array for smart antenna cellular communications systems," *Electronics Letters*, Vol. 36, No. 16, pp. 1342-1343, 2000
- 21 S. L. Preston, D. V. Thiel, "Direction finding using a switched parasitic antenna array," *Proceedings of the IEEE Antennas Propagat. Soc. URSI Radio Sci. Meet*, Montreal, Canada, pp. 1024-1027, July 1997
- 22 S. L. Preston, D. V. Thiel, J. W. Lu, S. G. O' Keefe, T. A. Smith, "Base-station tracking in mobile communications using a switched parasitic antenna array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 46, No. 6, pp. 841-844, June 1998
- 23 P. K. Varlamos, C. N. Capsalis, "Direction-of-arrival estimation (DoA) using switched parasitic planar arrays and the method of genetic algorithms," *Wireless Personal Communications Journal*, Vol. 28, No. 1, pp. 59-75, January 2004
- 24 K. Pahlavan, A. Levesque, *Wireless Information Networks*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995, pp. 50-56.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΕΠΙΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΜΕ ΕΝΕΡΓΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΕ ΚΥΨΕΛΩΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

#### 5.1 Γενικά στοιχεία

Τα κεραιοσυστήματα επιλογής δέσμης που θα μελετηθούν σε αυτό το κεφάλαιο, αποτελούνται από ενεργά και παρασιτικά στοιχεία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ψηφιακή διαμόρφωση δέσμης όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους. Μια κατάλληλη ψηφιακή κωδικολέξη με μήκος  $N$ , όπου  $N$  το πλήθος των στοιχείων που απαρτίζουν το κεραιοσύστημα, αποτελούμενη από τα σημεία '1' και '0', εφαρμόζεται στο σύστημα τροφοδότησης της κεραίας. Για κάθε κωδικολέξη, προκύπτει ένα μοναδικό διάγραμμα ακτινοβολίας του κεραιοσυστήματος ανάμεσα από τα  $2^N-1$  πιθανά (η κωδικολέξη με όλα τα σημεία '0' εξαιρείται). Τα σημεία '1' και '0' αναπαριστούν τα ενεργά και παρασιτικά στοιχεία του κεραιοσυστήματος, αντίστοιχα. Τα γραμμικά κεραιοσυστήματα, έχουν συμμετρικό διάγραμμα ακτινοβολίας στο αζιμουθικό επίπεδο. Αντιθέτως, τα επίπεδα κεραιοσυστήματα, μπορούν να καλύψουν όλο το αζιμουθικό επίπεδο και να σχεδιαστούν ώστε να εμφανίζουν κεντρικούς λοβούς κάθε  $\left(\frac{360}{q}\right)^\circ$ , όπου η μεταβλητή  $q$  εκφράζει το πλήθος των κύριων λοβών [1].

#### 5.2 Σύστημα επιλογής δέσμης με 7 ενεργά και παρασιτικά στοιχεία

Στις ακόλουθες παραγράφους περιγράφεται η διαδικασία σχεδίασης ενός κεραιοσυστήματος 7 ενεργών και παρασιτικών στοιχείων καθώς και η επίδοση του συστήματος σε περιβάλλον κυψελωτής τηλεφωνίας.

##### 5.2.1 Στοιχεία σχεδιασμού

Για τη σχεδίαση του συστήματος που αξιολογήθηκε, έγινε χρήση γενετικού αλγόριθμου [2]. Με τη διαδικασία αυτή, βελτιστοποιήθηκαν τα ζητούμενα χαρακτηριστικά του κεραιοσυστήματος και καθορίστηκαν η θέση των στοιχείων στο χώρο και οι φάσεις των εφαρμοζόμενων τάσεων στα στοιχεία. Οι τεχνικές roulette

wheel selection, simple crossover με  $p_{crossover} = 0.8$  και binary mutation με  $p_{mutation} = 0.04$ , εφαρμόστηκαν [3-4]. Στόχος της σχεδίασης ήταν η κάλυψη όλου του αζιμουθικού επίπεδου με λοβούς κάθε  $60^\circ$  και σχετικό επίπεδο πρώτου δευτερεύοντος λοβού μικρότερο κατά τουλάχιστον 3 dB. Η σχεδίαση έγινε εφικτή με την επιλογή κατάλληλης ψηφιακής κωδικολέξης, ανάμεσα από τις  $2^N - 1$  πιθανές, η οποία θα μεγιστοποιούσε την αντικειμενική συνάρτηση που περιείχε τα ζητούμενα χαρακτηριστικά του κεραιοσυστήματος. Οι ακόλουθοι πίνακες 5.1-5.3 παρέχουν τα ηλεκτρικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ευφυούς κεραίας 7-διπόλων.

Ψηφιακή κωδικολέξη	Διεύθυνση μέγιστου κέρδους $\phi_{max} (^\circ)$	$\phi_{-3dB}^- (^\circ)$	$\phi_{-3dB}^+ (^\circ)$	$\Delta\phi_{-3dB} (^\circ)$	Σχετικό επίπεδο πρώτου δευτερεύοντος λοβού (Relative Side Lobe level S.L.L.) (dB)
0110010	31.10	2.03	55.84	53.81	-5.56
0000011	89.18	54.89	114.85	59.96	-12.41
0000001	148.12	109.00	189.49	80.49	-3.32
0101100	211.98	180.71	239.96	59.25	-3.73
1100000	276.42	240.33	310.88	70.55	-8.94
1010000	332.43	305.29	359.16	53.87	-4.14

Πίνακας 5.1 Ψηφιακές κωδικολέξεις, διευθύνσεις μέγιστου κέρδους, εύρος 3 dB και σχετικό επίπεδο πρώτου δευτερεύοντος λοβού

Στοιχείο	$x_m(\lambda)$	$y_m(\lambda)$	$\delta_m(\text{rad})$
1	0.68269	0.29063	0.42339
2	0.87479	0.63954	2.61452
3	0.95015	0.74330	0.35733
4	0.43318	0.29939	4.74985
5	0.10149	0.31746	2.69084
6	0.39505	0.64619	4.41774
7	0.32344	0.60335	5.72366

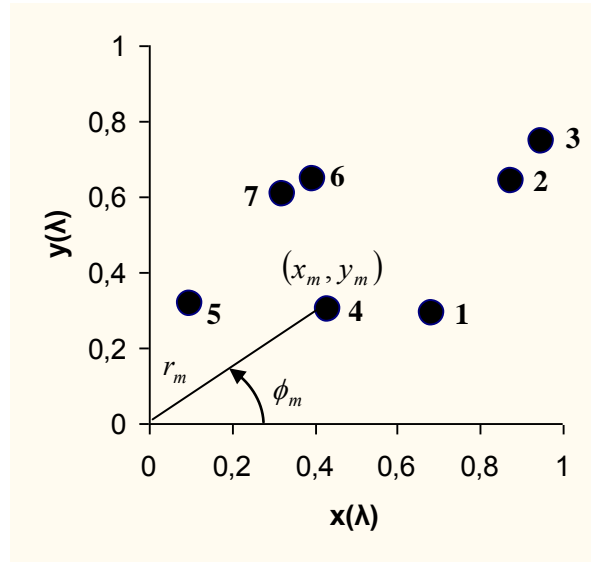
Πίνακας 5.2 Θέσεις και φάσεις τάσης των στοιχείων

$$Z = \begin{bmatrix} 73.1+42.2i & 6.6-37.4i & -16.2-26.7i & 40.9-28.3i & -22.0-18.7i & -5.3-34.2i & -8.7-32.5i \\ 6.6-37.4i & 73.1+42.2i & 63.7-1.0i & -20.2-21.8i & -14.6+15.4i & -9.3-32.1i & -19.3-23.0i \\ -16.2-26.7i & 63.7-1.0i & 73.1+42.2i & -25.2-2.4i & -1.6+19.0i & -20.4-21.4i & -25.0-9.2i \\ 40.9-28.3i & -20.2-21.8i & -25.2-2.4i & 73.1+42.2i & 21.6-36.7i & 16.4-37.5i & 22.5-36.5i \\ -22.0-18.7i & -14.6+15.4i & -1.6+19.0i & 21.6-36.7i & 73.1+42.2i & -2.2-35.4i & 14.7-37.6i \\ -5.3-34.2i & -9.3-32.1i & -20.4-21.4i & 16.4-37.5i & -2.2-35.4i & 73.1+42.2i & 69.0+12.8i \\ -8.7-32.5i & -19.3-23.0i & -25.0-9.2i & 22.5-36.5i & 14.7-37.6i & 69.0+12.8i & 73.1+42.2i \end{bmatrix}$$

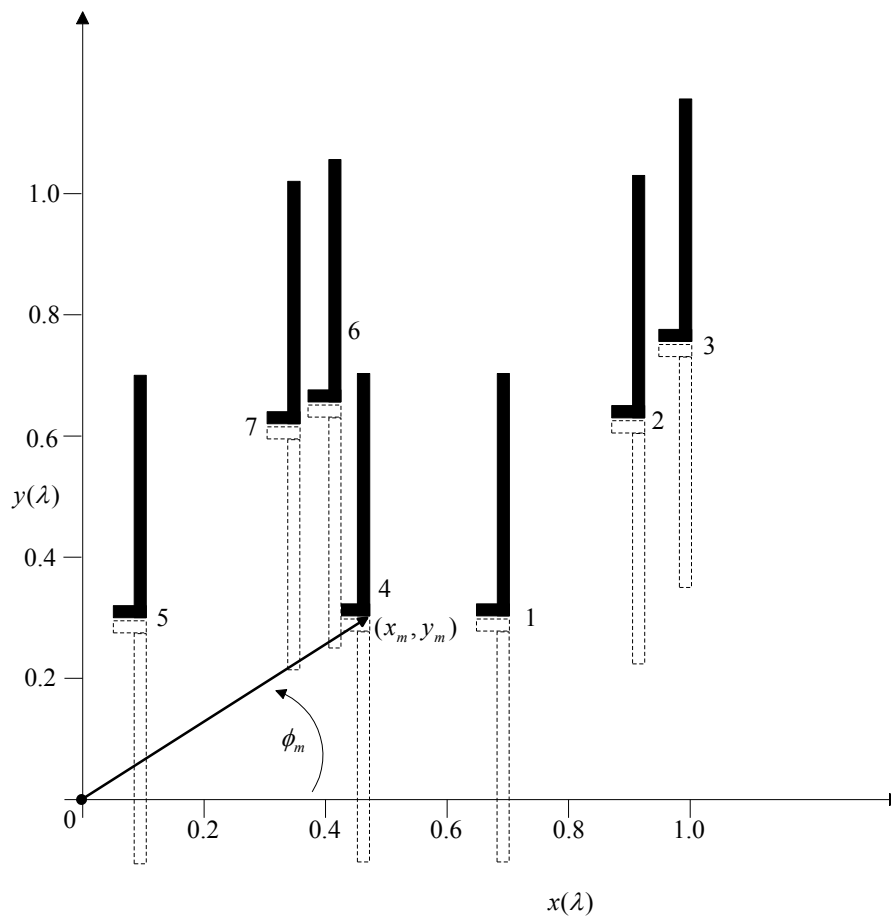
Πίνακας 5.3 Πίνακας εμπέδησης



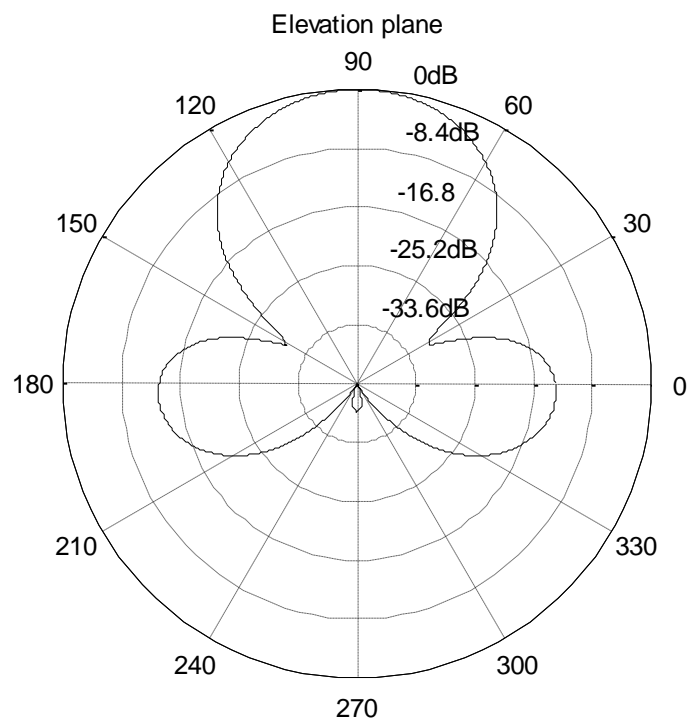
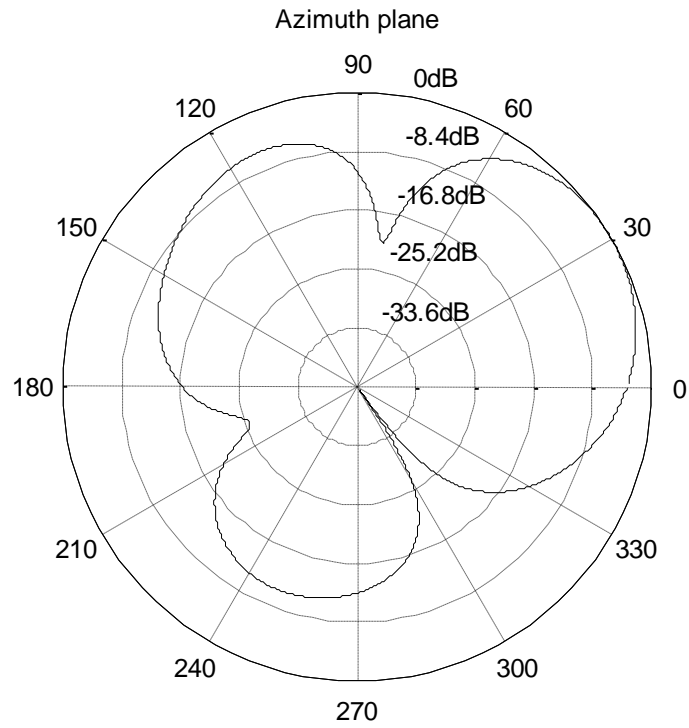
Τα σχήματα 5.1α και 5.1β, παρουσιάζουν τη χωροθέτηση των στοιχείων ενώ τα ακόλουθα σχήματα 5.2 – 5.7 παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα διαγράμματα ακτινοβολίας όπως προέκυψαν από τη σχεδίαση.



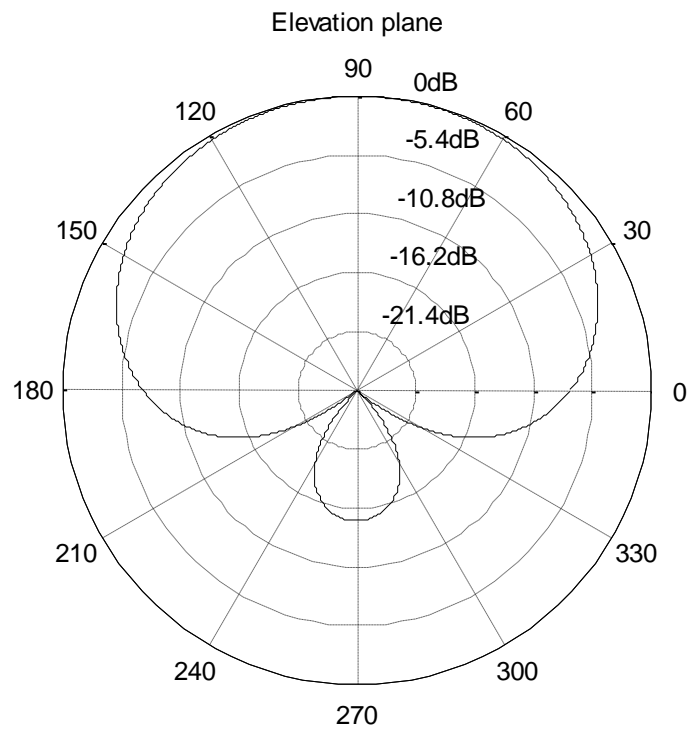
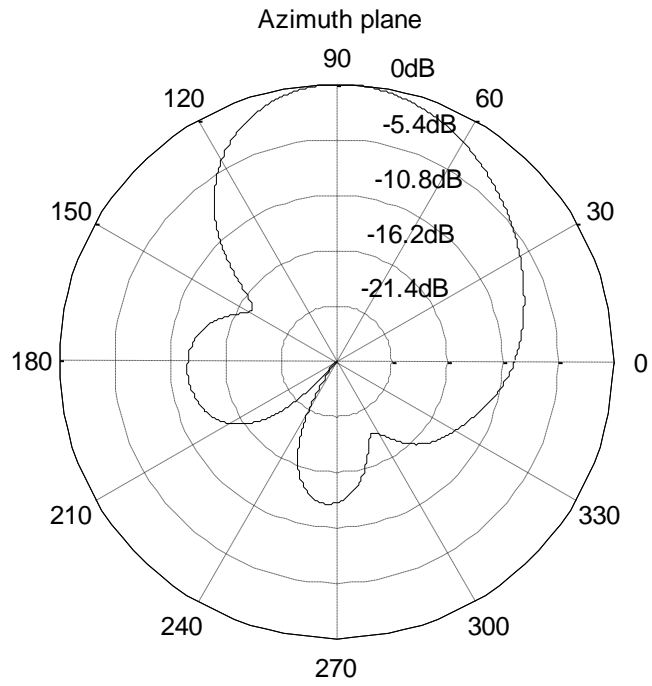
Σχήμα 5.1α Χωροθέτηση των 7 στοιχείων



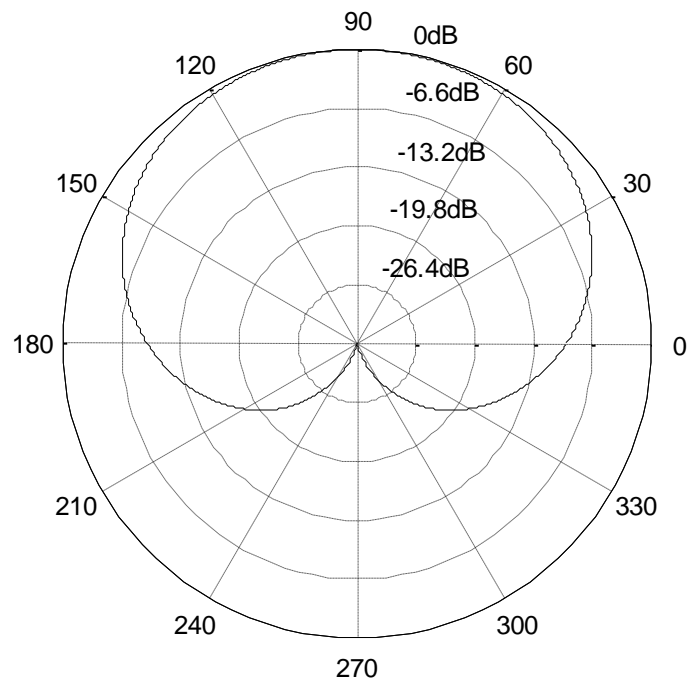
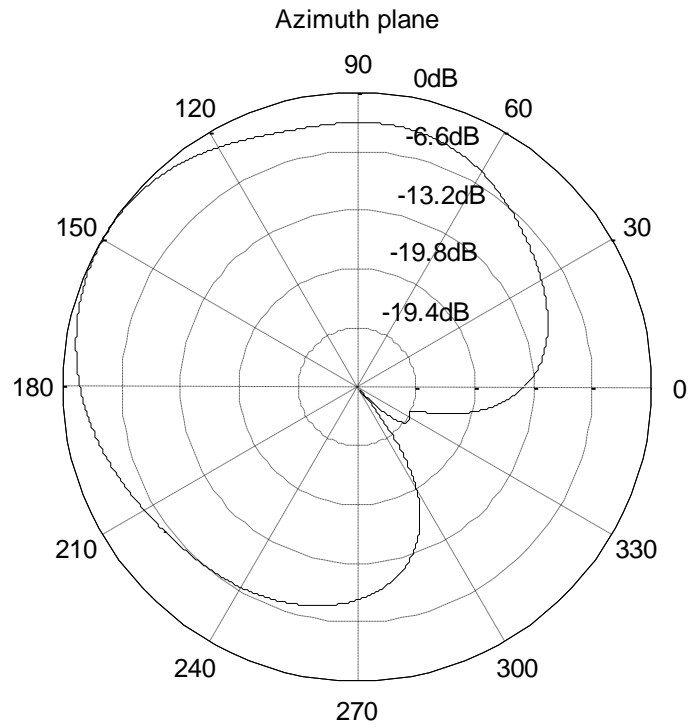
Σχήμα 5.1β Χωροθέτηση των 7 στοιχείων



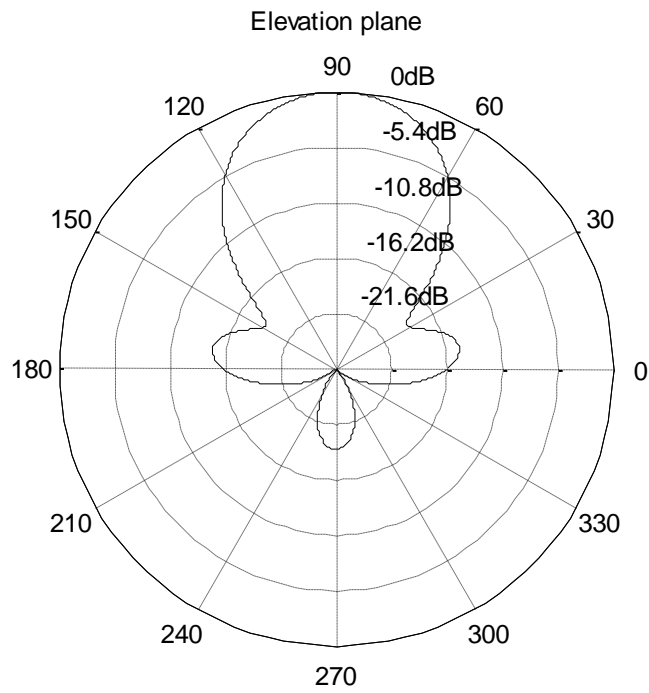
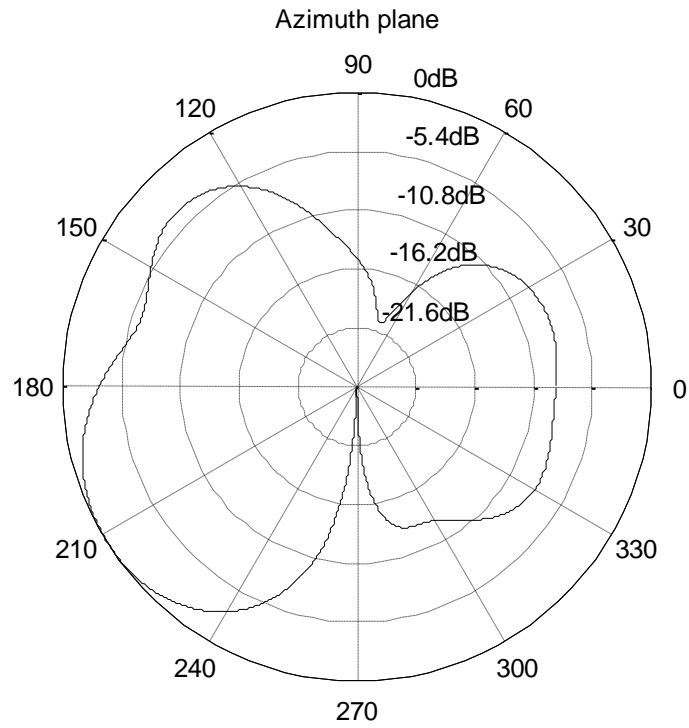
Σχήμα 5.2 Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο για την κωδικολέξη '0110010'



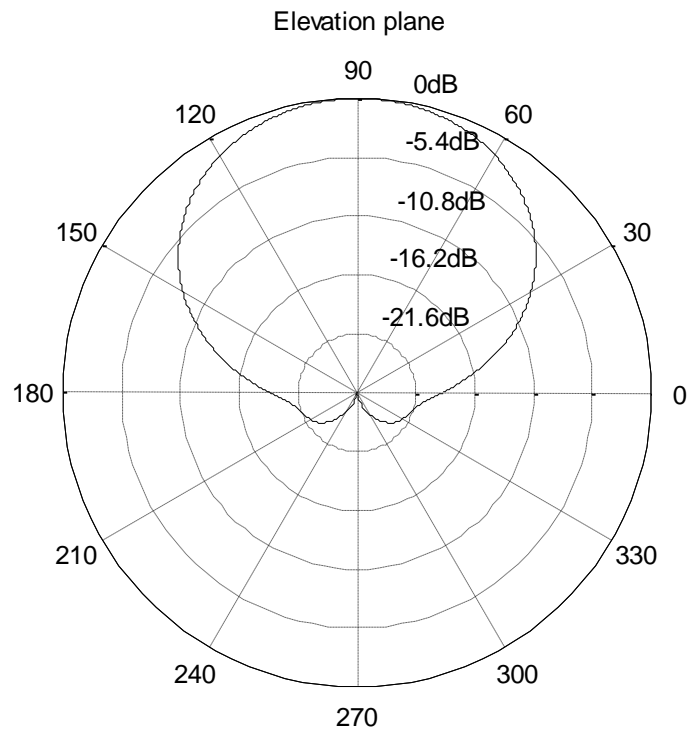
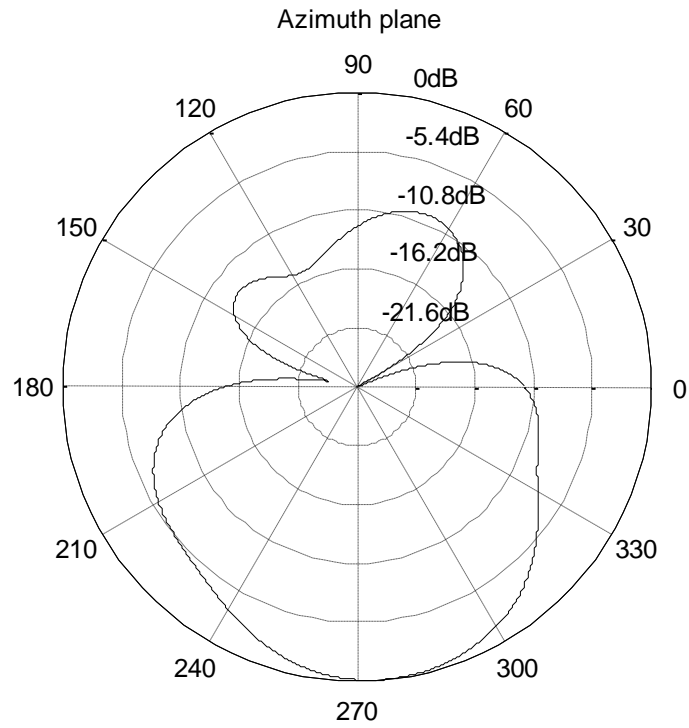
Σχήμα 5.3 Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο για την κωδικολέξη ‘0000011’



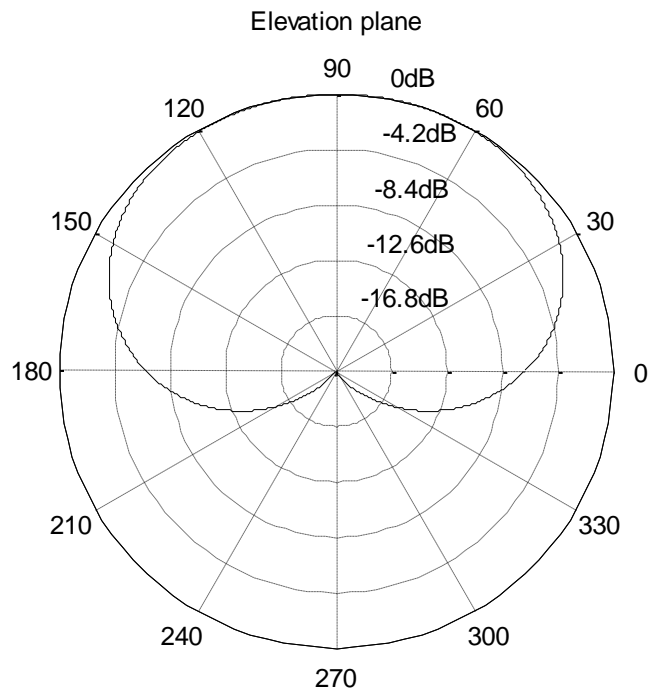
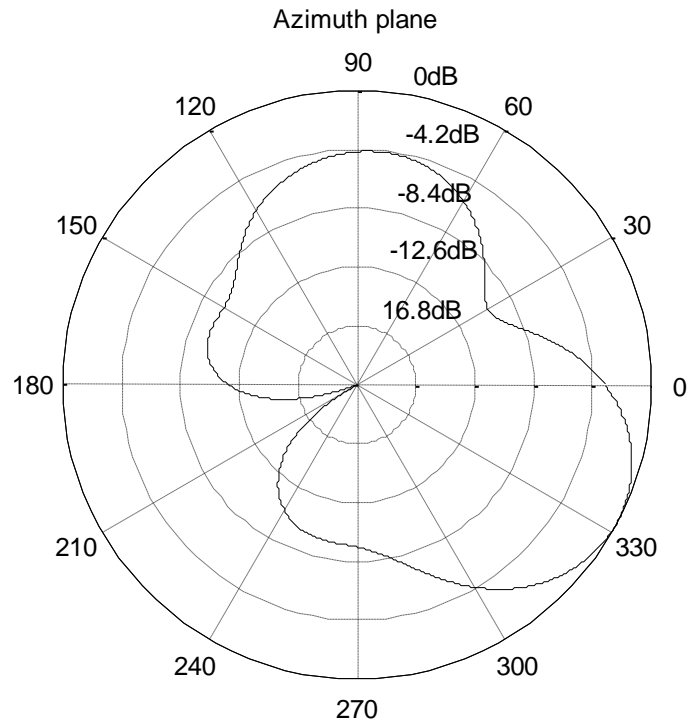
Σχήμα 5.4 Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο για την κωδικολέξη ‘0000001’



Σχήμα 5.5 Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο για την κωδικολέξη ‘0101100’



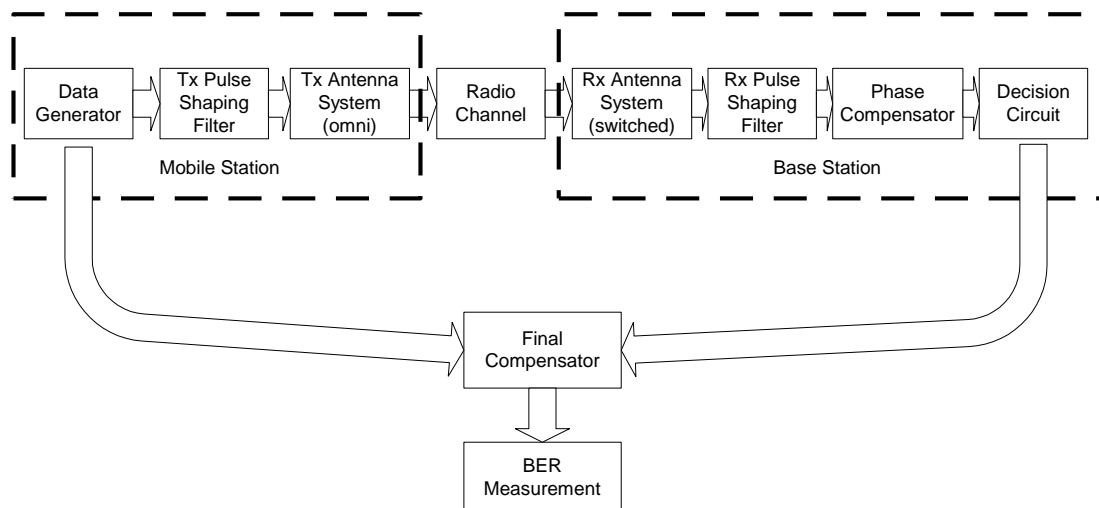
Σχήμα 5.6 Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο για την κωδικολέξη ‘1100000’



Σχήμα 5.7 Κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο για την κωδικολέξη '1010000'

### 5.2.2 Μοντέλο προσομοίωσης επίδοσης κεραιοσυστήματος 7 διπόλων – κριτήριο ο ρυθμός λαθών BER

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα παρουσιαστούν τα βασικά πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση ευφυούς κεραιοσυστήματος 7 διπόλων επιλογής δέσμης σε σχέση με τη χρησιμοποίηση συμβατικής ομοιοκατευθυντικής κεραίας. Ο ρυθμός λαθών (BER), στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink) αποτελεί το κριτήριο και το δείκτη για την ανάδειξη της βελτιωμένης ποιοτικά συμπεριφοράς της κεραίας. Το μοντέλο προσομοίωσης παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8 Μοντέλο προσομοίωσης

Ο σταθμός βάσης θεωρείται τύπου macro ενώ οι χρήστες ενδιαφέροντος αλλά και οι χρήστες-παρεμβολείς, θεωρούνται τυχαία κατανεμημένοι στην ευρύτερη περιοχή που καλύπτει ο σταθμός. Το σχήμα διαμόρφωσης είναι BPSK με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων από 256 kbps έως 2048 kbps. Το διαμορφωμένο σήμα, πριν γίνει η εκπομπή, περνά από ένα root Nyquist φίλτρο με roll-off factor ίσο με 0.5. Στην πλευρά του δέκτη, το ίδιο φίλτρο χρησιμοποιείται πριν γίνει η αποδιαμόρφωση του σήματος. Επιπρόσθετα, το TDMA πλαίσιο αποτελείται από 200 bits/frame



περιλαμβανομένης και της ακολουθίας εκπαίδευσης (training sequence) που αποτελείται από 26 bits. Να σημειωθεί ότι θεωρήθηκαν οι ακολουθίες εκπαίδευσης του συστήματος κινητής τηλεπικοινωνίας GSM [5-7].

Σε όλες τις προσομοιώσεις θεωρήθηκε ότι για τους χρήστες-παρεμβολείς ο λόγος ενέργειας bit προς το θόρυβο ( $E_b/N_0$ ) είναι ίσος με 15dB, ενώ για τους χρήστες ενδιαφέροντος η αντίστοιχη τιμή κυμαινόταν από 2dB μέχρι 20dB. Πριν ξεκινήσει η επικοινωνία μεταξύ κινητού χρήστη και σταθμού βάσης, θεωρήθηκε ότι ο χρήστης εκπέμπει στη χρονοθυρίδα του το πλαίσιο που περιέχει την ακολουθία εκπαίδευσης, τόσες φορές όσες το πλήθος των διαγραμμάτων ακτινοβολίας του κεραιοσυστήματος. Η απόφαση για την ενεργή δέσμη παίρνεται με βάση την ακόλουθη διαδικασία : η λαμβανόμενη ακολουθία εκπαίδευσης από κάθε διάγραμμα ακτινοβολίας συσχετίζεται με τη γνωστή και αναμενόμενη ακολουθία εκπαίδευσης του χρήστη. Η συσχέτιση που δίνει τη μέγιστη τιμή, καθορίζει το ενεργό διάγραμμα ακτινοβολίας. Ουσιαστικά λοιπόν, με το προς αξιολόγηση κεραιοσύστημα έξι (6) διαγραμμάτων, σε διάρκεια έξι (6) TDMA πλαισίων, έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία επιλογής της βέλτιστης δέσμης που καλύπτει τον χρήστη.

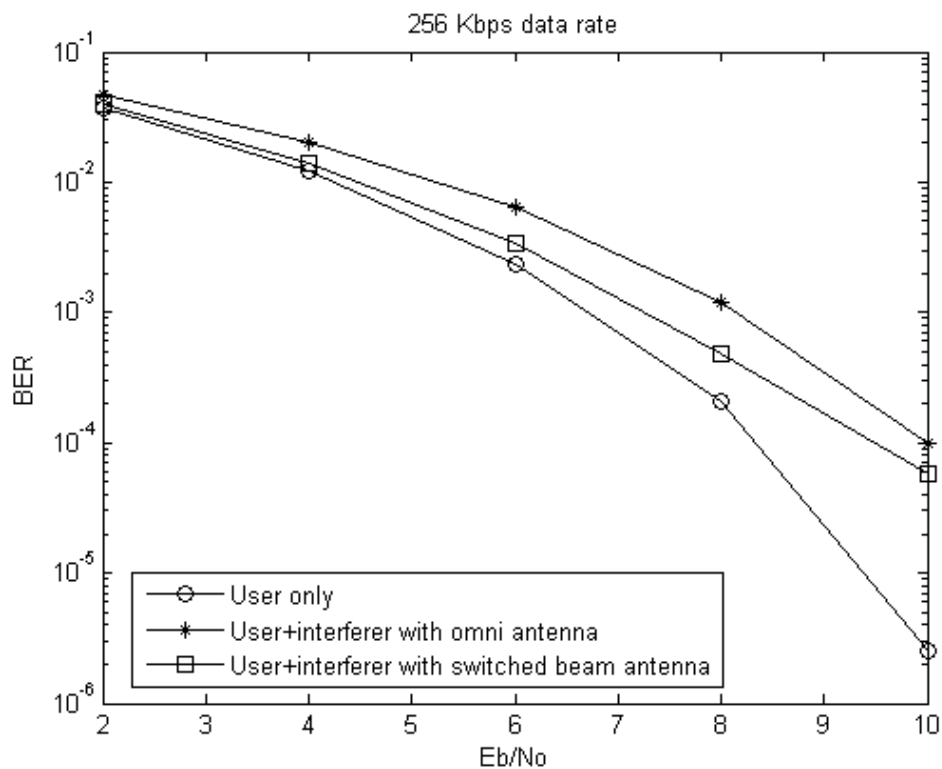
### 5.2.3 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης

Η επίδοση του κεραιοσυστήματος αξιολογήθηκε στα πλαίσια δύο διαφορετικών σεναρίων συνθηκών διάδοσης: 1) κανάλι προσθετικού θορύβου AWGN [8-9] και 2) κανάλι Rayleigh [10-12] μιας διαδρομής (one-path Rayleigh flat fading channel) με προσθετικό θόρυβο AWGN. Πρέπει να τονιστεί ότι στις προσομοιώσεις θεωρήθηκε το ισοδύναμο μοντέλο βασικής ζώνης για τις παραπάνω συνθήκες διάδοσης.

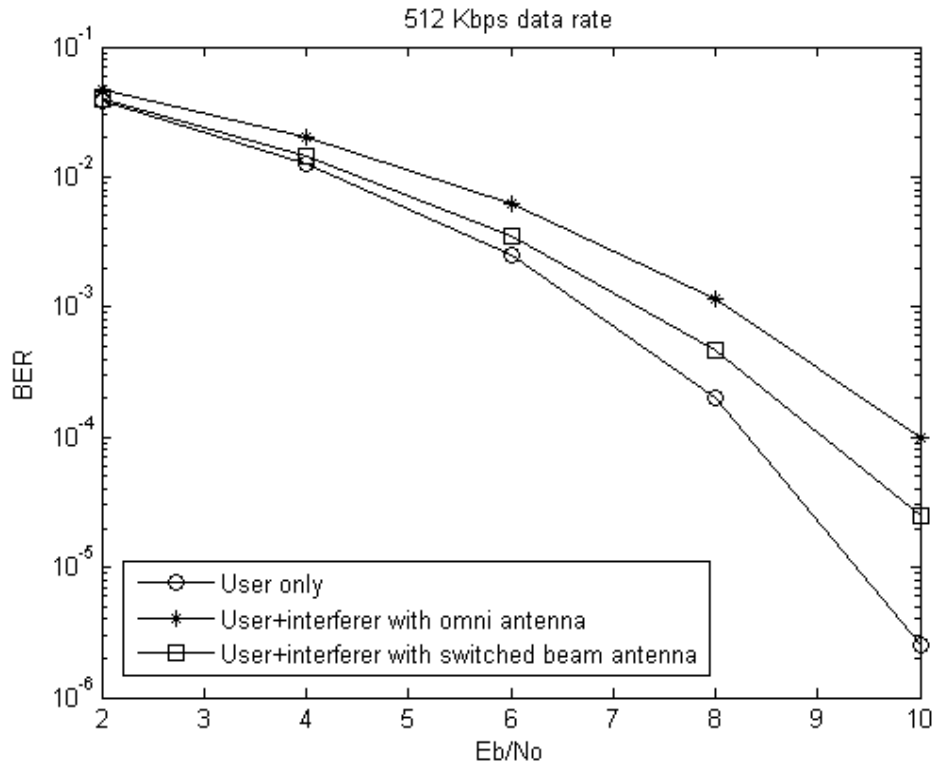
Αναλυτικότερα, για το σενάριο όπου θεωρήθηκε μόνο προσθετικός θόρυβος AWGN, ο σταθμός βάσης προσομοιώθηκε να λαμβάνει μόνο το 20% της εκπεμπόμενης ισχύος του σήματος παρεμβολής. Επομένως η επίδραση στα δεδομένα του χρήστη ενδιαφέροντος, αρχικά θεωρήθηκε χαμηλή. Στα ακόλουθα σχήματα 5.9α-5.9δ παρουσιάζεται η επίδοση του κεραιοσυστήματος συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου  $E_b/N_0$  του χρήστη ενδιαφέροντος και του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων.

Είναι φανερό ότι ο ρυθμός λαθών που παρουσιάζεται, είναι σημαντικά μειωμένος όταν ο σηματοθορυβικός λόγος κυμαίνεται από 2dB μέχρι 6 dB. Στην

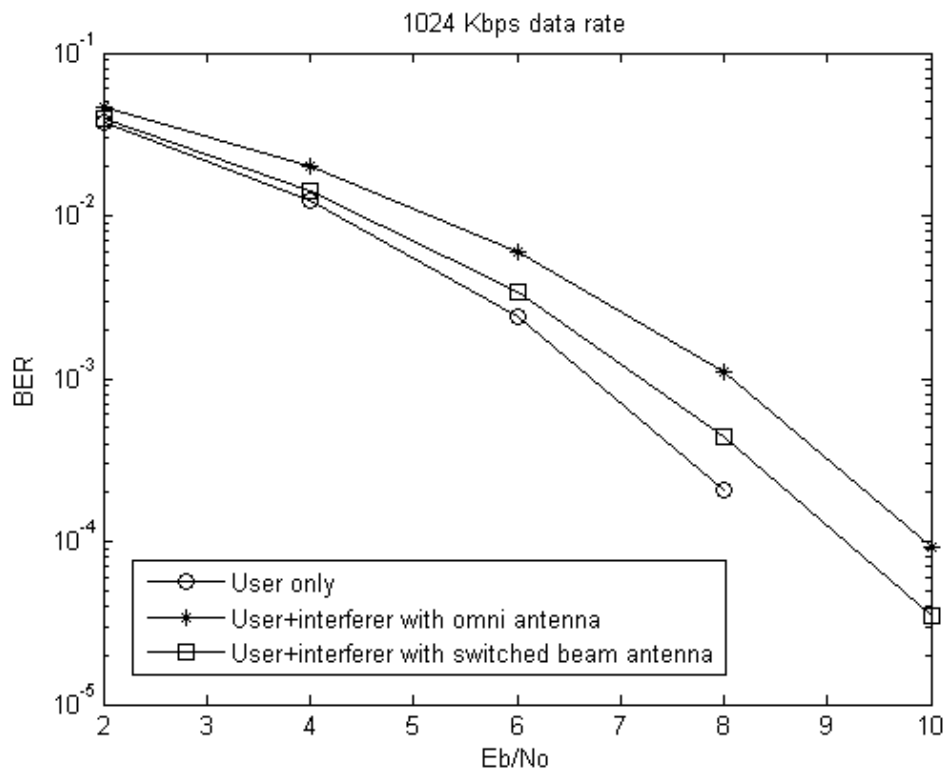
περιοχή αυτών των τιμών, ο ρυθμός λαθών είναι ελαφρά πιο αυξημένος από το ρυθμό λαθών που παρουσιάζεται με απουσία σημάτων παρεμβολής. Για τιμές του  $E_b/N_0$  μεγαλύτερες των 8dB, η τιμή του BER είναι τουλάχιστον δύο φορές μικρότερη σε σχέση με την τιμή για την περίπτωση της ομοιοκατευθυντικής κεραίας.



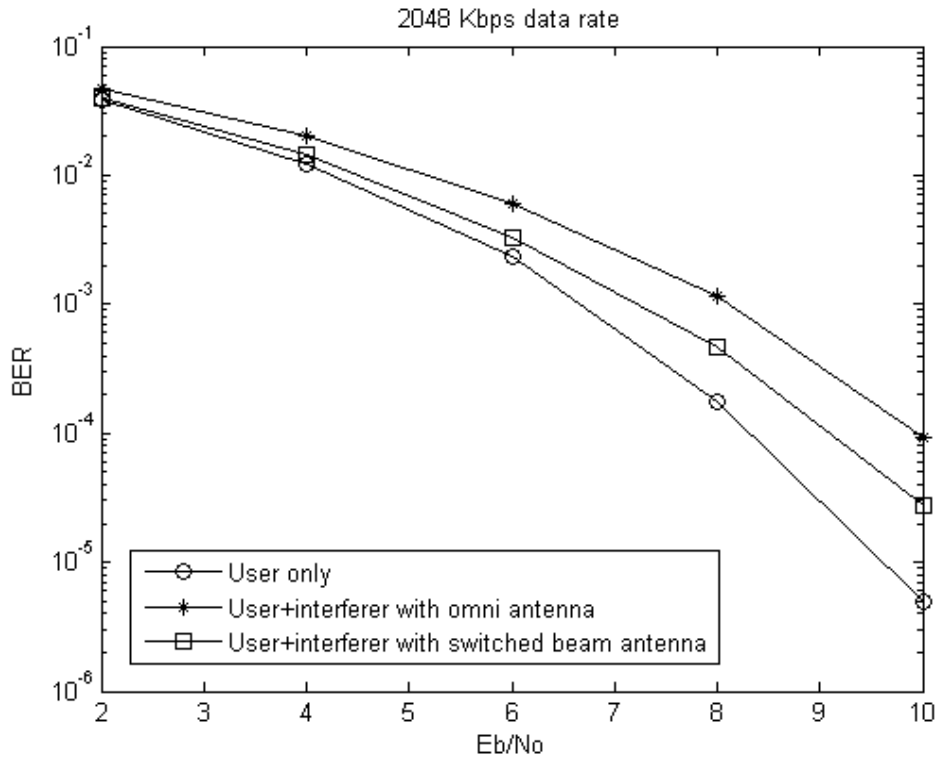
Σχήμα 5.9α Επίδοση κεραιοσυστήματος σε περιβάλλον προσθετικού Gaussian θορύβου (AWGN)-ρυθμός μετάδοσης δεδομένων 256 kbps



Σχήμα 5.9β Επίδοση κεραιοσυστήματος σε περιβάλλον προσθετικού Gaussian θορύβου (AWGN)-ρυθμός μετάδοσης δεδομένων 512 kbps



Σχήμα 5.9γ Επίδοση κεραιοσυστήματος σε περιβάλλον προσθετικού Gaussian θορύβου (AWGN)-ρυθμός μετάδοσης δεδομένων 1024 kbps

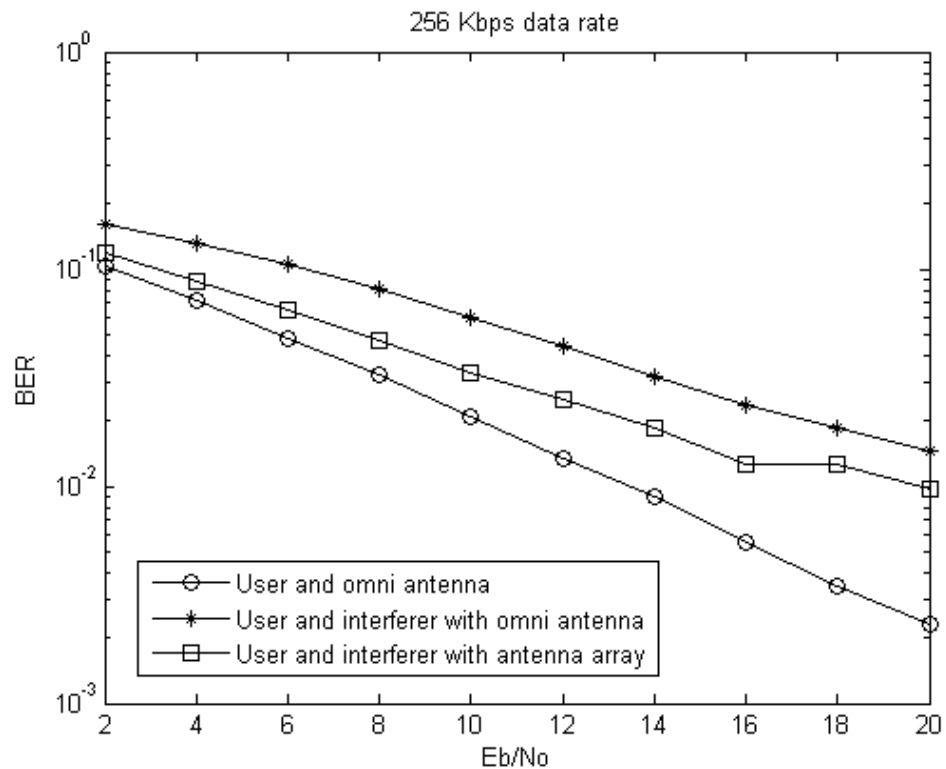


Σχήμα 5.9δ Επίδοση κεραιοσυστήματος σε περιβάλλον προσθετικού Gaussian θορύβου (AWGN)-ρυθμός μετάδοσης δεδομένων 2048 kbps

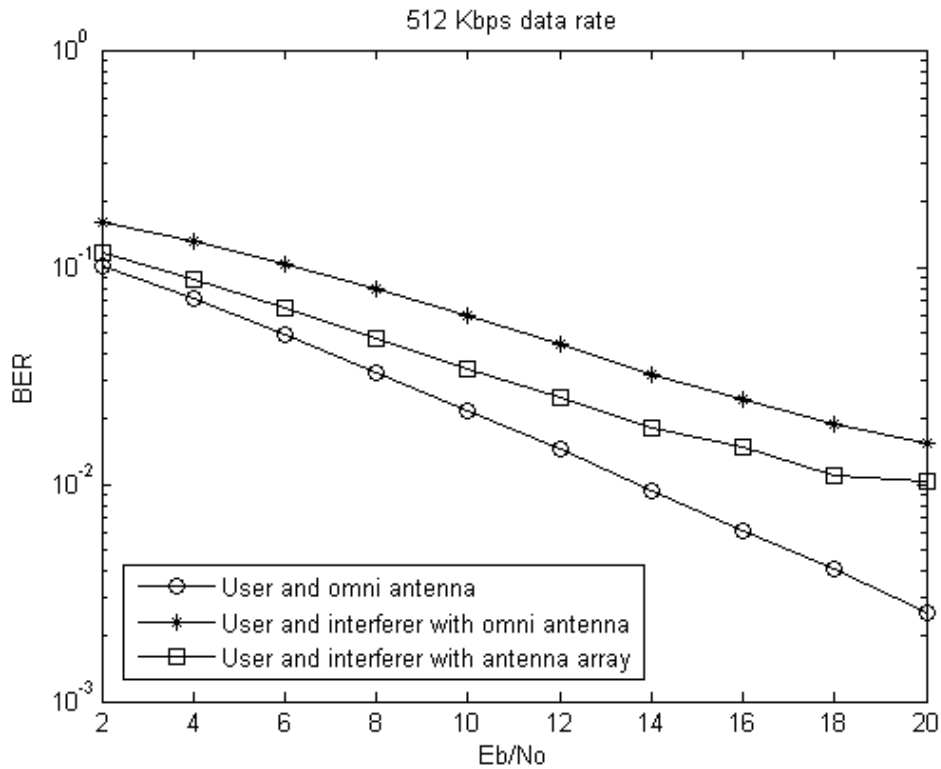
Ανάλογα αποτελέσματα προέκυψαν από την προσομοίωση για το σενάριο με συνθήκες διάδοσης καναλιού Rayleigh μιας διαδρομής και προσθετικού θορύβου AWGN. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω σχήματα 5.10α-5.10δ.

Στο σενάριο αυτό θεωρήθηκε ότι ο σταθμός βάσης λαμβάνει 60% από την εκπεμπόμενη ισχύ του σήματος παρεμβολής. Είναι κατανοητό ότι επιλέχθηκε ένα πιο σύνθετο σενάριο ώστε να αξιολογηθεί η επίδοση του κεραιοσυστήματος κάτω από δυσμενέστερες συνθήκες διάδοσης με πολλαπλές διακυμάνσεις των σημάτων. Οι χρήστες θεωρήθηκε ότι κινούνται με ταχύτητα 72 Km/h, ενώ η συχνότητα εκπομπής θεωρήθηκε ίση με 2.4 GHz. Τα δύο τελευταία στοιχεία οδηγούν σε συχνότητα Doppler  $f_D$  ίση με 160 Hz. Για ακόμη μια φορά, ο ρυθμός λαθών BER είναι μειωμένος μέχρι και 50%, καθιστώντας εξαιρετικά βελτιωμένη την ποιοτική συμπεριφορά του τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Επιπρόσθετα, συγκρίνοντας την απαιτούμενη σηματοθορυβική σχέση  $E_b/N_0$  για συγκεκριμένο ρυθμό λαθών BER, εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι παρουσιάζεται ένα κέρδος της τάξης των 4dB. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς μπορεί να ενσωματωθεί η τιμή των

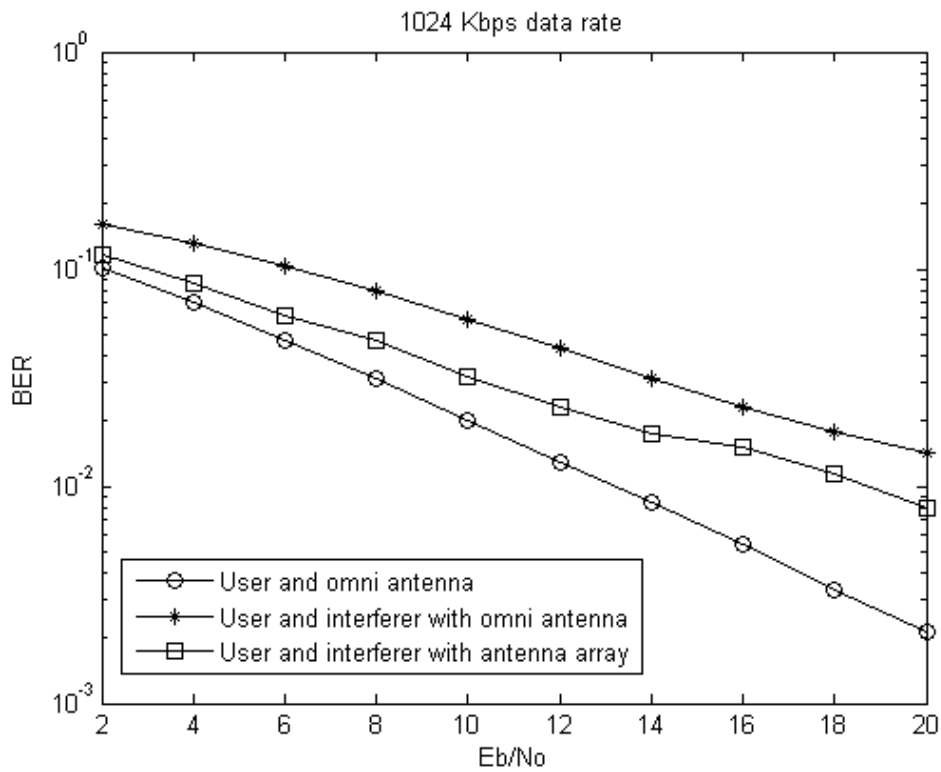
4dB ως επιπλέον κέρδος, στον υπολογισμό για τις απώλειες ισχύος μεταξύ του χρήστη και του σταθμού βάσης.



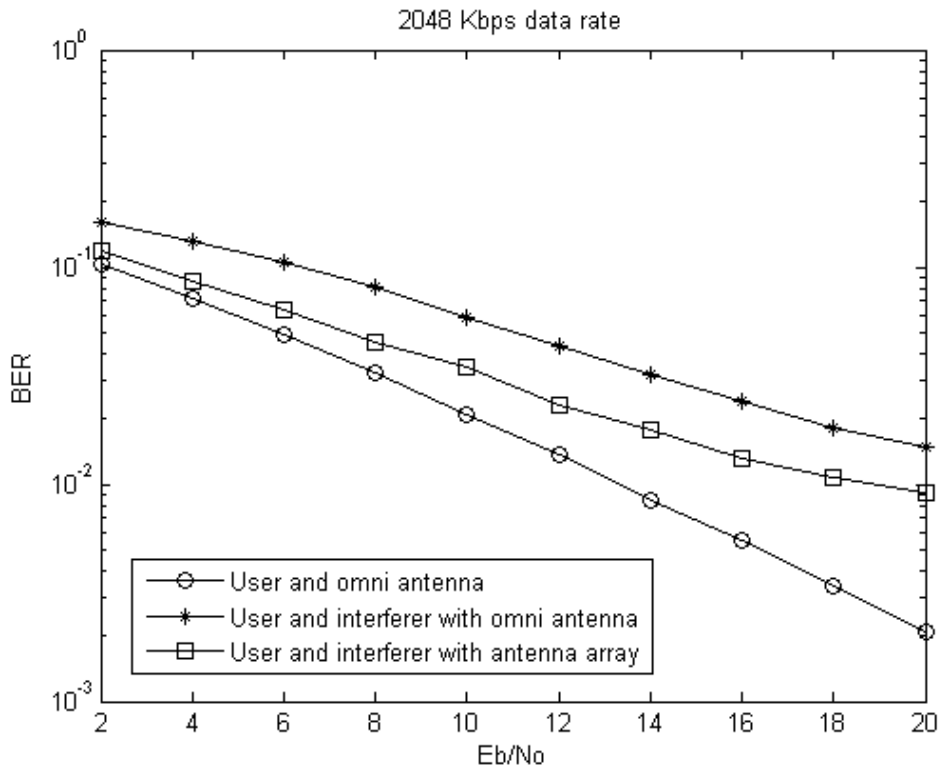
Σχήμα 5.10α Επίδοση κεραιοσυστήματος σε περιβάλλον Rayleigh μιας διαδρομής και προσθετικού Gaussian θορύβου (AWGN) – ρυθμός μετάδοσης 256 kbps



Σχήμα 5.10β Επίδοση κεραιοσυστήματος σε περιβάλλον Rayleigh μιας διαδρομής και προσθετικού Gaussian θορύβου (AWGN) – ρυθμός μετάδοσης 512 kbps



Σχήμα 5.10γ Επίδοση κεραιοσυστήματος σε περιβάλλον Rayleigh μιας διαδρομής και προσθετικού Gaussian θορύβου (AWGN) – ρυθμός μετάδοσης 1024 kbps



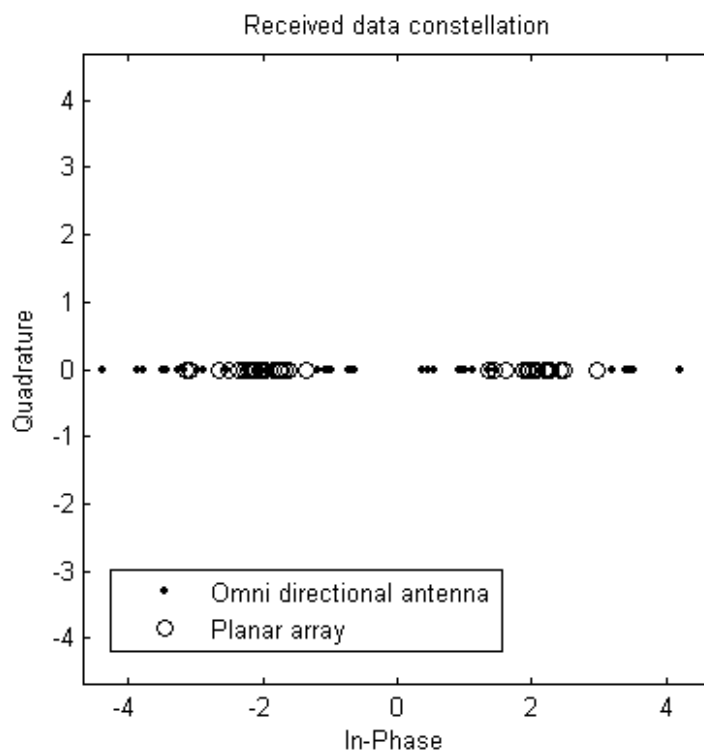
Σχήμα 5.10δ Επίδοση κεραιοσυστήματος σε περιβάλλον Rayleigh μιας διαδρομής και προσθετικού Gaussian θορύβου (AWGN) – ρυθμός μετάδοσης 2048 kbps

Στο ακόλουθο σχήμα 5.11 παρουσιάζεται το διάγραμμα αστερισμού για σηματοθορυβικό λόγο ίσο με 4 dB και ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ίσο με 2048 kbps. Είναι φανερό ότι υπάρχει σαφώς μικρότερη διασπορά των δεδομένων λήψης όταν χρησιμοποιείται το κεραιοσύστημα σε σύγκριση με την πανκατευθυντική κεραία.

Από τα σχήματα 5.9-5.11, φαίνεται ότι ο δέκτης στον σταθμό βάσης, στην περίπτωση που είναι εγκατεστημένο το ευφυές κεραιοσύστημα, είναι δυνατόν να λειτουργεί με χαμηλότερο κατώφλι αποκοπής από αυτό που θα λειτουργούσε εάν στο σταθμό υπήρχε συμβατική ομοιοκατευθυντική κεραία.

Από τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων προκύπτει ότι ο ρυθμός λαθών κατά την επικοινωνία του κινητού χρήστη με το σταθμό βάσης, είναι μειωμένος. Η παρουσία επίπεδης κεραίας επιλογής δέσμης με ενεργά και παρασιτικά στοιχεία, προσφέρει ένα επιπλέον κέρδος αναλόγως των συνθηκών διάδοσης. Αυτό το επιπλέον κέρδος οδηγεί σε επαύξηση της ακτίνας κάλυψης του σταθμού βάσης, ενώ ταυτόχρονα καλύτερος έλεγχος της εκπεμπόμενης ισχύος από το σταθμό βάσης μπορεί να επιτευχθεί. Όλη η παραπάνω ανάλυση καθώς και τα συμπεράσματα έχουν

δημοσιευθεί στο επιστημονικό περιοδικό Progress in Electromagnetic Research, PIER 62, σελ. 89-106, 2006 [13].



Σχήμα 5.11 Διάγραμμα αστερισμού δεδομένων λήψης

#### 5.2.4 Μοντέλο προσομοίωσης επίδοσης κεραιοσυστήματος 7 διπόλων – κριτήριο ο λόγος επιθυμητού σήματος προς παρεμβολές CIR

Τα θέματα παρεμβολικών σημάτων ήταν είναι και θα παραμείνουν ένα σημαντικό κεφάλαιο στην υποβάθμιση της απόδοσης του κάθε τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Η τεχνική της διαμόρφωσης δέσμης είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη στα κυψελωτά συστήματα τηλεπικοινωνιών και αποτελεί ένα μέσο βελτιστοποίησης της χρήσης των συχνοτικών πόρων. Εφαρμόζοντας την παραπάνω τεχνική σε σταθμούς βάσης, η ομοδιαυλική παρεμβολή και η λήψη σημάτων λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης από μη επιθυμητούς χρήστες, μπορεί να μειωθεί δραστικά. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι η βελτίωση της ποιότητας της παρεχόμενης υπηρεσίας στους χρήστες του συστήματος. Ο λόγος του επιθυμητού σήματος προς το σύνολο των



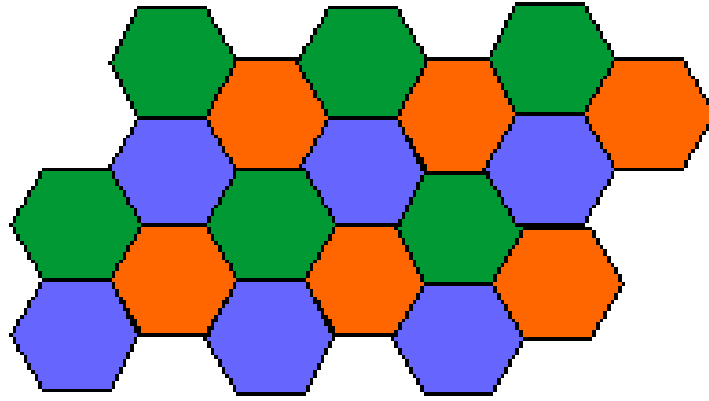
σημάτων που αποτελούν ομοδιαυλική παρεμβολή (Carrier to Interference ratio – CIR) είναι ένας από τους σημαντικούς παράγοντες που καθορίζουν και τη χωρητικότητα του συστήματος. Με την τεχνική διαμόρφωσης δέσμης, ο λόγος CIR μπορεί να βελτιστοποιηθεί και επομένως να βελτιωθεί και η χωρητικότητα του συστήματος.

Στις ακόλουθες παραγράφους θα αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα από τη χρήση της κεραίας επιλογής δέσμης ενεργών και παρασιτικών στοιχείων όταν το συγκεκριμένο κεραιοσύστημα εγκατασταθεί σε σταθμό βάσης ή στον τερματικό σταθμό, στη θέση ενός ομοιοκατευθυντικού κεραιοσυστήματος. Υπάρχουν διάφορες παράμετροι με τις οποίες μπορεί να αξιολογηθεί η τεχνική διαμόρφωσης δέσμης, παράμετροι που πολλές φορές είναι άμεσα συνδεδεμένοι με το χρησιμοποιούμενο σχήμα πρόσβασης. Στην ανάλυση που επιχειρήθηκε, επιλέχθηκε ο λόγος CIR καθώς αποτελεί μια παράμετρο ανεξάρτητη του σχήματος πρόσβασης. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, επικεντρώθηκαν σε αυτή τη φάση στην ανερχόμενη ζεύξη. Σε ακόλουθες παραγράφους θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα και για την κατερχόμενη ζεύξη. Ένα δίκτυο από 19 σταθμούς βάσης επιλέχθηκε, οι σταθμοί θεωρήθηκαν εξοπλισμένοι με το προτεινόμενο κεραιοσύστημα και το μικρό αυτό δίκτυο διαστασιοποιήθηκε με cluster size ίσο με 3. Στα ακόλουθα σχήματα 5.12 και 5.13 φαίνονται δύο δίκτυα με διαφορετικά cluster size.

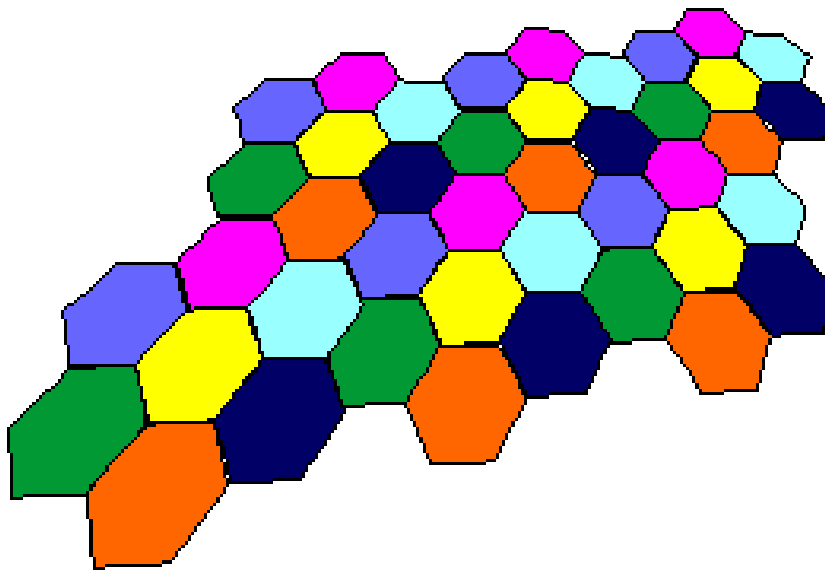
Η ακτίνα της περιοχής κάλυψης για τους σταθμούς βάσης ήταν μεταβλητή και καθορίστηκε στα 30m για το σενάριο του picocell, 100m για την περίπτωση microcell, 500m για την περίπτωση midicell και 1-3Km για την περίπτωση macrocell. Αυτές οι τέσσερις περιπτώσεις καλύπτουν σε σημαντικό βαθμό τους τύπους των ενεργών σήμερα σταθμών βάσης. Το αντίστοιχο ύψος των σταθμών ήταν και αυτό μεταβλητό και φαίνεται συγκεντρωτικά στον ακόλουθο πίνακα 5.4.

	<b>Picocell</b>	<b>Microcell</b>	<b>Midicell</b>	<b>Macrocell</b>
<b>Ύψος σταθμού βάσης</b>	5m	10m	20m	0m
	10m	20m	40m	
	15m	30m	60m	

Πίνακας 5.4 Ύψος σταθμών βάσης για τις προσομοιώσεις



Σχήμα 5.12 Δίκτυο με cluster size=3



Σχήμα 5.13 Δίκτυο με cluster size=7

Για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις θεωρήθηκε ότι τα κινητά τερματικά είχαν και δεν είχαν ενεργοποιημένη τη συνθήκη ελέγχου εκπεμπόμενης ισχύος [14-15] (power control και no power control συνθήκη). Επίσης, οι τερματικές συσκευές ήταν εξοπλισμένες με ομοιοκατευθυντικές κεραιές σε αυτή τη φάση της μελέτης. Στην περίπτωση που δεν εφαρμοζόταν η συνθήκη ελέγχου εκπεμπόμενης ισχύος, η ισχύς των κινητών συσκευών ήταν πάντα ίση με τις συνολικές απώλειες διάδοσης από το σταθμό βάσης μέχρι το όριο της περιοχής κάλυψης. Αντιθέτως, με ενεργοποιημένη τη συνθήκη ελέγχου εκπεμπόμενης ισχύος, οι τερματικές συσκευές είχαν ισχύ ίση με τις τρέχουσες απώλειες διάδοσης ενισχυμένη κατά ένα περιθώριο το οποίο στη μελέτη αυτή ήταν ίσο με 3dB. Για όλες τις προσομοιώσεις εκτός από την περίπτωση του macrocell, το down tilt του κεραιοσυστήματος θεωρήθηκε μεταβλητό και ίσο από 0° έως 30°.

Στο αρχικό στάδιο της προσομοίωσης, καθορίζονται οι θέσεις των σταθμών βάσης καθώς και οι θέσεις των χρηστών. Να σημειωθεί ότι ένας χρήστης ανά σταθμό βάσης θεωρήθηκε ενώ η θέση του εντός της αντίστοιχης περιοχής κάλυψης ακολούθησε τυχαία κατανομή. Στο δεύτερο στάδιο της προσομοίωσης, αποστάσεις, γωνίες στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο ανάμεσα στους χρήστες και το σταθμό βάσης ενδιαφέροντος, υπολογίστηκαν. Στο επόμενο στάδιο, το ενεργό διάγραμμα ακτινοβολίας του κεντρικού σταθμού βάσης καθορίστηκε. Τέλος, υπολογίστηκε το σύνολο των λαμβανομένων σημάτων από όλους τους χρήστες μη ενδιαφέροντος στον κεντρικό σταθμό βάσης και καθορίστηκε ο λόγος CIR.

Ένα δεύτερο σετ από προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια, αυτή τη φορά θεωρώντας ότι τόσο ο σταθμός βάσης όσο και ο τερματικός χρήστης είναι εξοπλισμένοι με το προτεινόμενο κεραιοσύστημα. Επί της ουσίας λοιπόν σε αυτό το δεύτερο σετ, θεωρήθηκε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα τύπου MIMO (Multiple input-Multiple output) [16-17]. Ο κορμός της διαδικασίας παρέμεινε ο ίδιος όπως περιγράφηκε παραπάνω αλλά σε αυτό το στάδιο, το ενεργό διάγραμμα ακτινοβολίας δεν καθορίζεται μόνο στον κεντρικό σταθμό βάσης αλλά και σε όλους τους τερματικούς χρήστες.

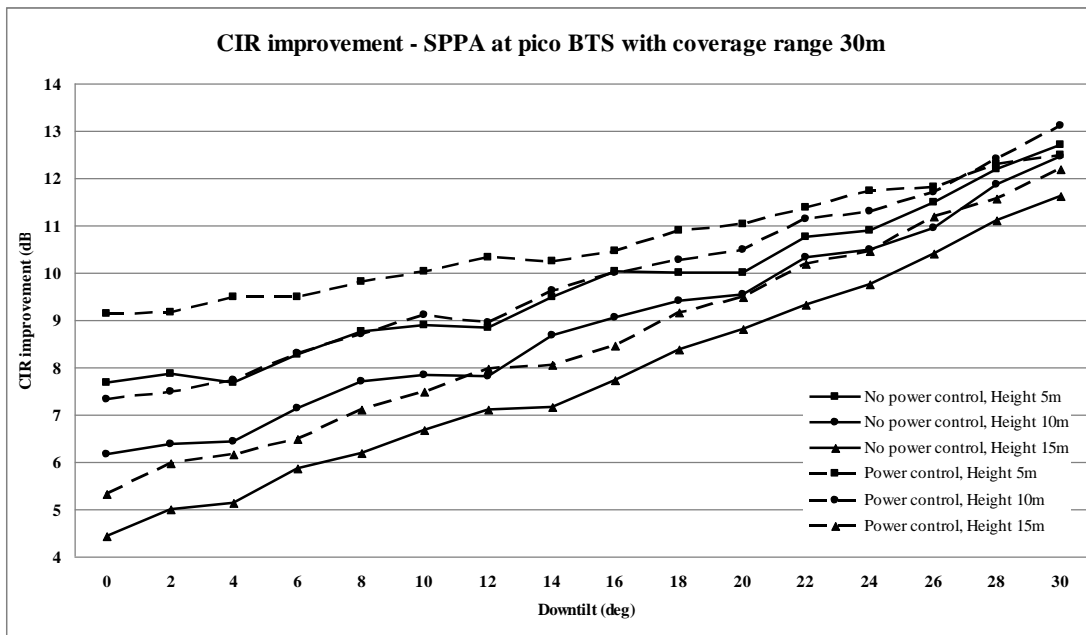
#### 5.2.5 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης-ανερχόμενη ζεύξη

Στα ακόλουθα σχήματα 5.14 – 5.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για όλους τους τύπους των σταθμών βάσης (pico cell, micro cell, midi cell και macro cell) και τις μεταβλητές παραμέτρους (ύψος σταθμού/κεραιοσυστήματος 5m, 10m και 15m) στην περίπτωση που το κεραιοσύστημα είναι εγκατεστημένο μόνο στο σταθμό βάσης.

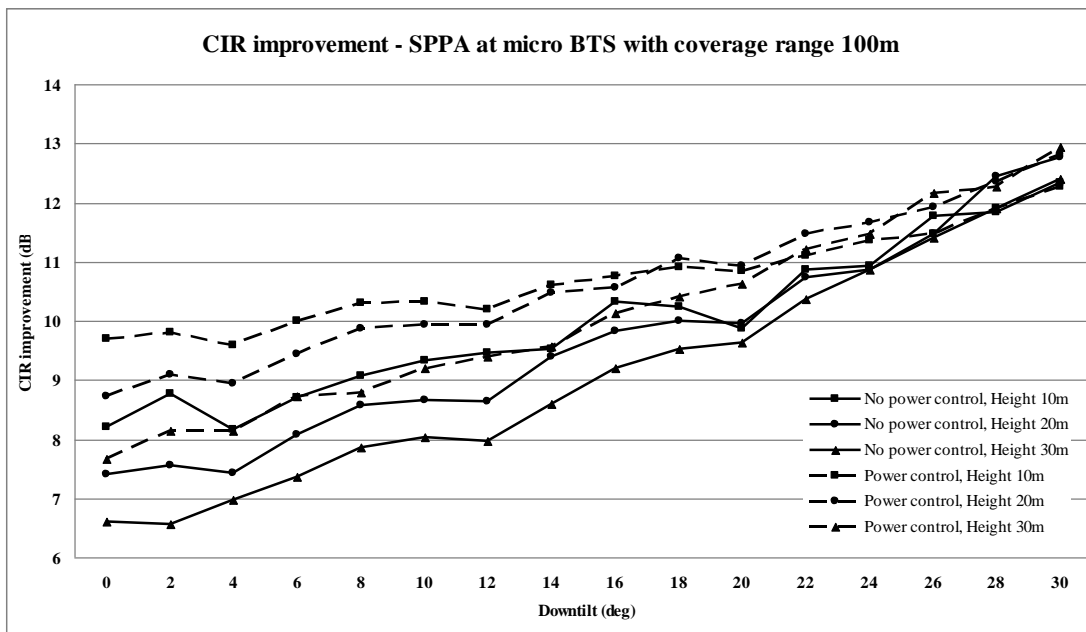
Είναι ξεκάθαρο ότι σε όλες τις περιπτώσεις η παρατηρούμενη βελτίωση στο λόγο CIR κυμαίνεται από 4 dB μέχρι 13dB. Επίσης αυτό που είναι φανερό είναι ότι στις περιπτώσεις με ενεργοποιημένη τη συνθήκη ελέγχου εκπεμπόμενης ισχύος, τα αποτελέσματα είναι βελτιωμένα σε σχέση με την περίπτωση που η συνθήκη είναι ανενεργή. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς οι κινητοί χρήστες κοντά στο σταθμό βάσης εκπέμπουν με μικρότερη ισχύ και επομένως δεν αποτελούν παρεμβολή για τους υπόλοιπους σταθμούς του δικτύου.

Μια άλλη σημαντική παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι η παράμετρος down tilt είναι ένας σημαντικός παράγοντας αποφυγής των παρεμβολικών σημάτων.

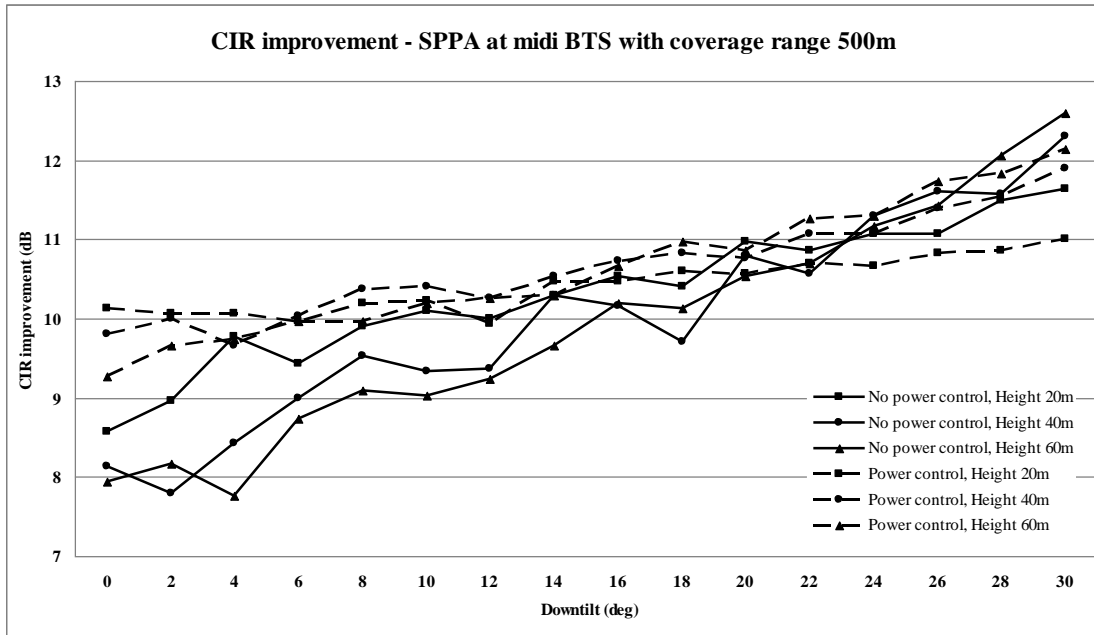
Και αυτό το γεγονός ήταν αναμενόμενο καθώς όσο πιο μεγάλο είναι το down tilt τόσο περισσότερο επικεντρώνεται η περιοχή κάλυψης. Στις προσομοιώσεις παρατηρήθηκε ότι αυξάνοντας το down tilt αυξάνεται και η βελτίωση στο λόγο CIR. Το συγκεκριμένο κεραιοσύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι διευρυμένο στο κατακόρυφο επίπεδο. Ένα πιο στενό κεραιοσύστημα στο κατακόρυφο επίπεδο πιθανόν να είχε ακόμη καλύτερα αποτελέσματα από τα παρακάτω.



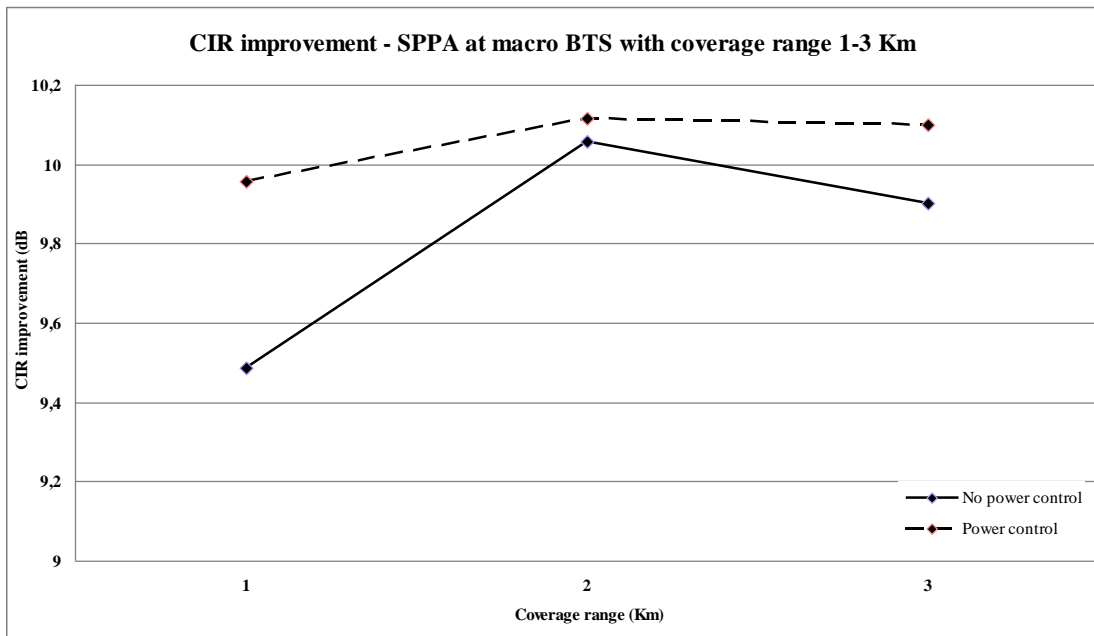
Σχήμα 5.14 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης-περίπτωση pico cell



Σχήμα 5.15 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης-περίπτωση micro cell

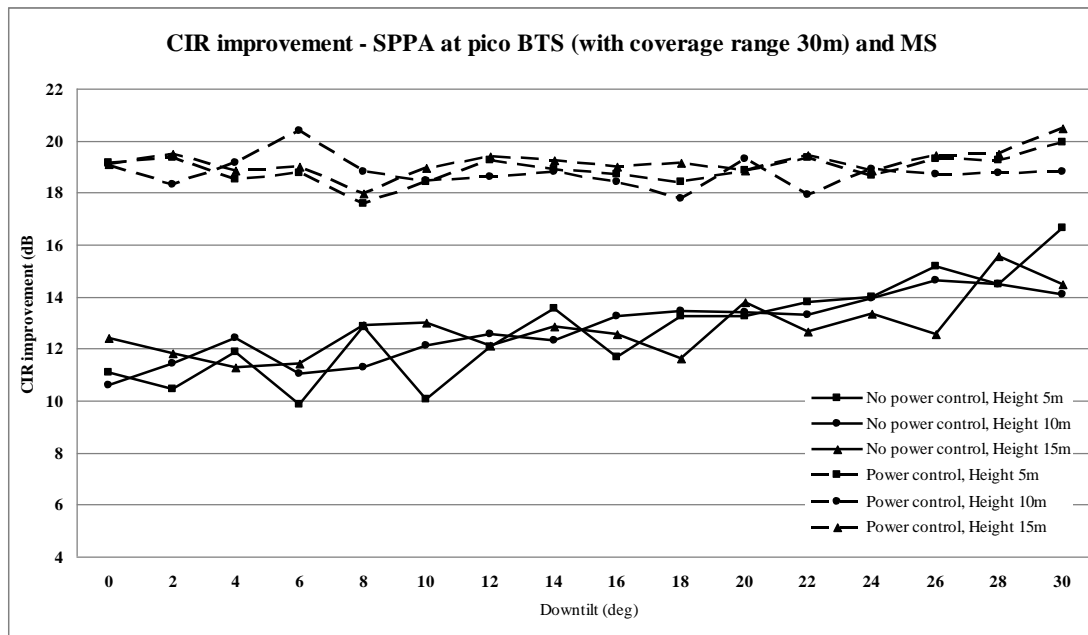


Σχήμα 5.16 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης-περίπτωση midi cell

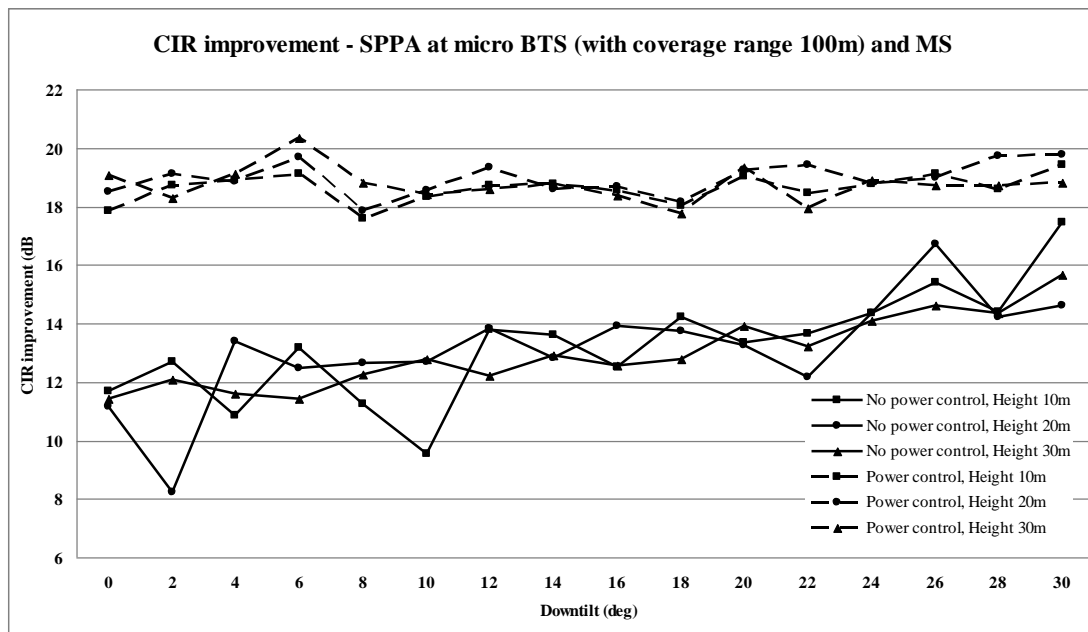


Σχήμα 5.17 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης-περίπτωση macro cell

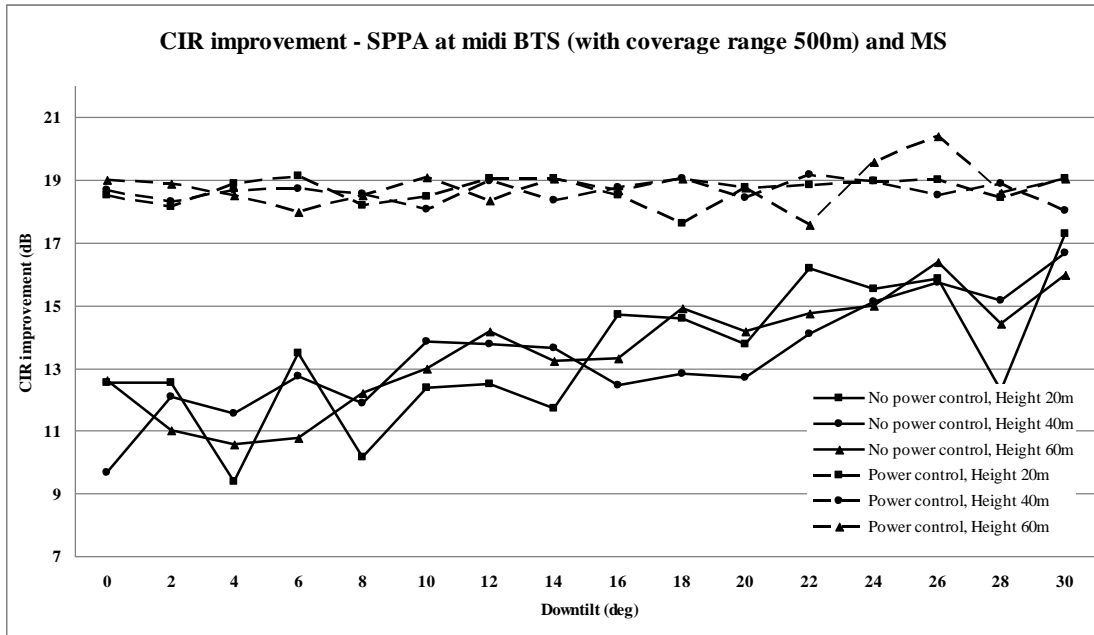
Στα ακόλουθα σχήματα 5.18 – 5.21, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θεωρώντας ότι το κεραιοσύστημα επιλογής δέσμης είναι εγκατεστημένο τόσο στο σταθμό βάσης όσο και στους τερματικούς χρήστες. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η εφαρμογή της τεχνικής διαμόρφωσης δέσμης και στα δυο άκρα του τηλεπικοινωνιακού συστήματος επιφέρει μια σημαντική βελτίωση στην ποιότητα του τηλεπικοινωνιακού καναλιού.



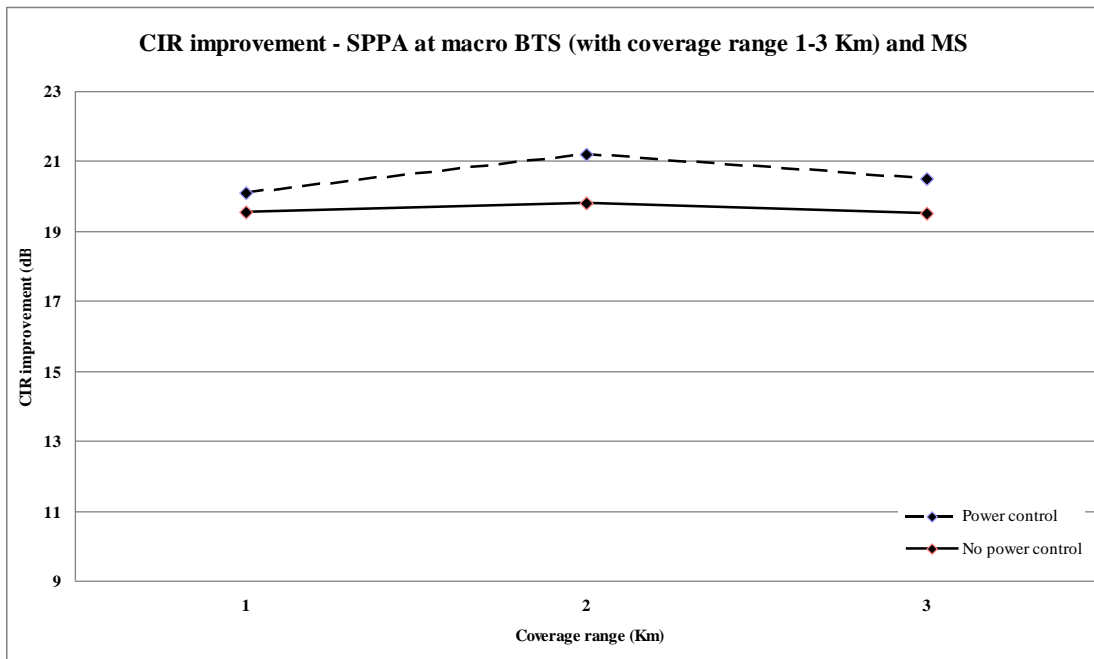
Σχήμα 5.18 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης και κινητό χρήστη -περίπτωση pico cell



Σχήμα 5.19 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης και κινητό χρήστη -περίπτωση micro cell



Σχήμα 5.20 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης και κινητό χρήστη -περίπτωση midi cell



Σχήμα 5.21 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης και κινητό χρήστη -περίπτωση macro cell

Στην περίπτωση του pico cell, χωρίς τη συνθήκη ελέγχου εκπεμπόμενης ισχύος, η βελτίωση του CIR είναι της τάξης των 6dB περίπου. Για την ίδια περίπτωση αλλά με ενεργοποιημένη τη συνθήκη εκπεμπόμενης ισχύος, υπάρχει μια επιπλέον βελτίωση του λόγου CIR που κυμαίνεται από 7dB-12dB. Υπολογίζοντας λοιπόν τη συνολική αύξηση του CIR που επέρχεται στο τηλεπικοινωνιακό κανάλι, φαίνεται να κυμαίνεται από 18dB-20dB. Παρόμοιες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν και για τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

Για το midi cell, μια περίπτωση που οι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών και ιδιαίτερα τηλεφωνίας χρησιμοποιούν ευρέως ιδιαίτερα μετά την εισαγωγή των δικτύων τρίτης γενιάς 3G, χωρίς τη συνθήκη ελέγχου εκπομπής, η βελτίωση του CIR ξεκινά από 10dB-12dB και αυξάνεται μέχρι 16dB-17dB ανάλογα με το down tilt που εφαρμόζεται. Ενεργοποιώντας τη συνθήκη ελέγχου, η συνολική βελτίωση του CIR ανέρχεται σε 18dB-20dB χωρίς να παρουσιάζει διακυμάνσεις ανάλογα με το down tilt.

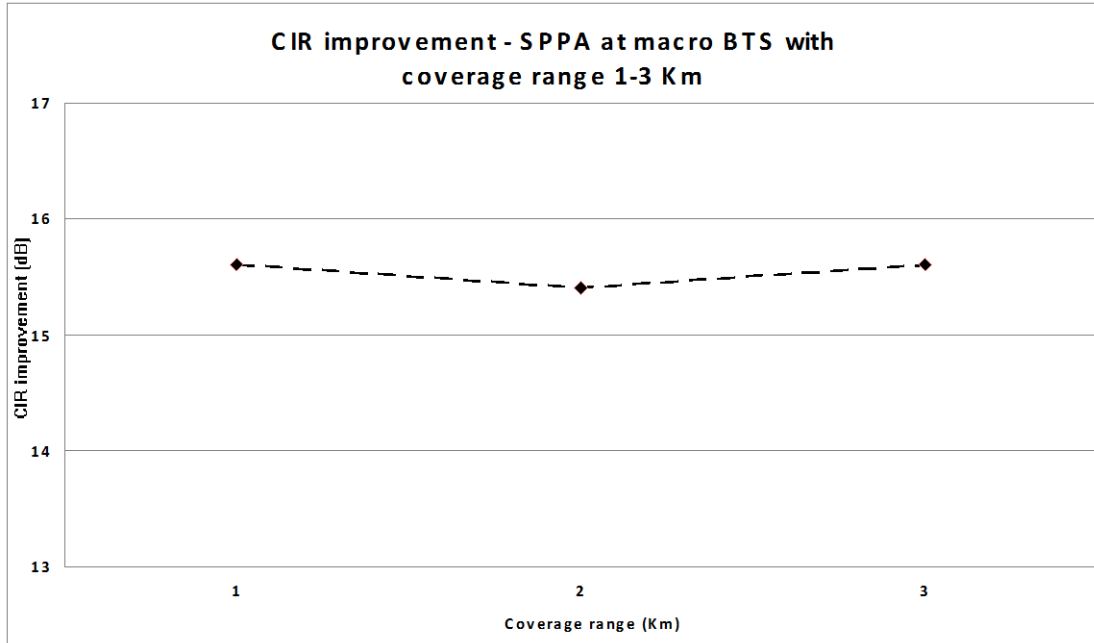
Σε αυτό το σετ των προσομοιώσεων η ενεργοποίηση η μη της συνθήκης ελέγχου εκπεμπόμενης ισχύος, είχε σημαντική συμμετοχή στην βελτίωση του λόγου CIR της τάξης των 5dB-8dB. Η παρατήρηση αυτή ήταν αναμενόμενη καθώς η γενική μείωση της ισχύος εκπομπής, εξαιτίας της ενεργής συνθήκης, και ο σωστός προσανατολισμός αυτής της εκπεμπόμενης ισχύος, λόγω της εφαρμογής της διαμόρφωσης δέσμης στους κινητούς χρήστες, περιόρισαν σε μεγάλο βαθμό την παρουσία παρεμβολικών σημάτων στον κεντρικό σταθμό βάσης.

#### *5.2.6 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης-κατερχόμενη ζεύξη*

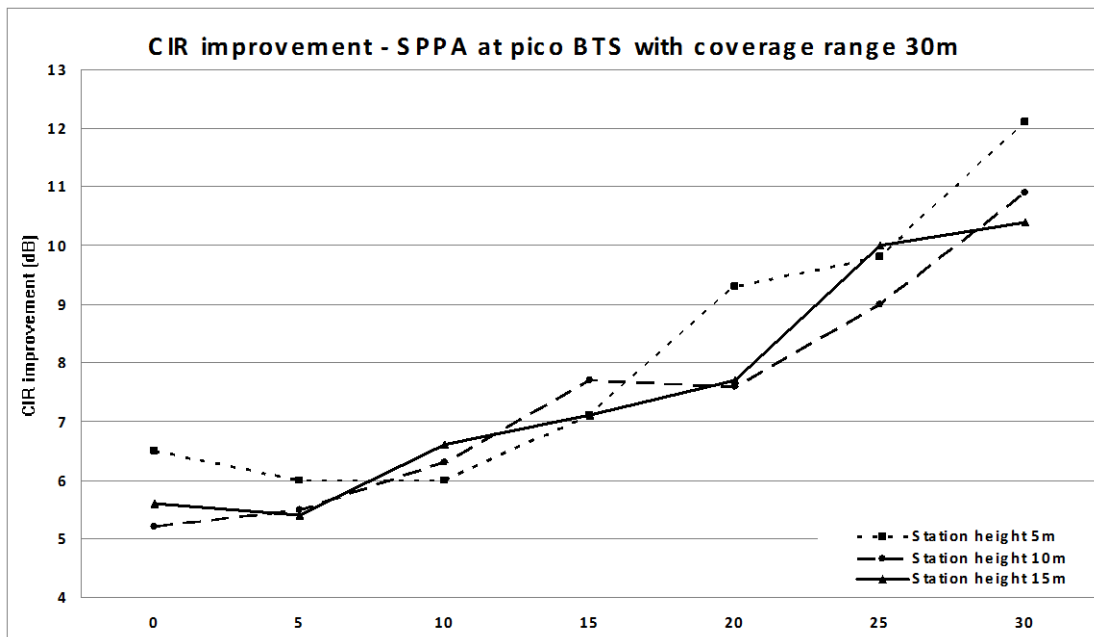
Μετά από τα αποτελέσματα για την ανερχόμενη ζεύξη, οι ίδιες προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για την κατερχόμενη ζεύξη. Σε αυτή την περίπτωση, η εκπεμπόμενη ισχύς του σταθμού βάσης πλέον, θεωρήθηκε ίση με τις συνολικές απώλειες μετάδοσης από το σημείο του σταθμού βάσης μέχρι τα όρια της περιοχής κάλυψης. Στα ακόλουθα σχήματα 5.22 μέχρι 5.25 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα θεωρώντας ότι το κεραιοσύστημα είναι εγκατεστημένο μόνο στο σταθμό βάσης. Εν συνεχεία στα σχήματα 5.26 μέχρι 5.29 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα θεωρώντας ότι το κεραιοσύστημα είναι εγκατεστημένο μόνο στον τερματικό σταθμό. Τέλος, στα σχήματα 5.30 μέχρι 5.33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα θεωρώντας ότι το κεραιοσύστημα είναι εγκατεστημένο τόσο στον



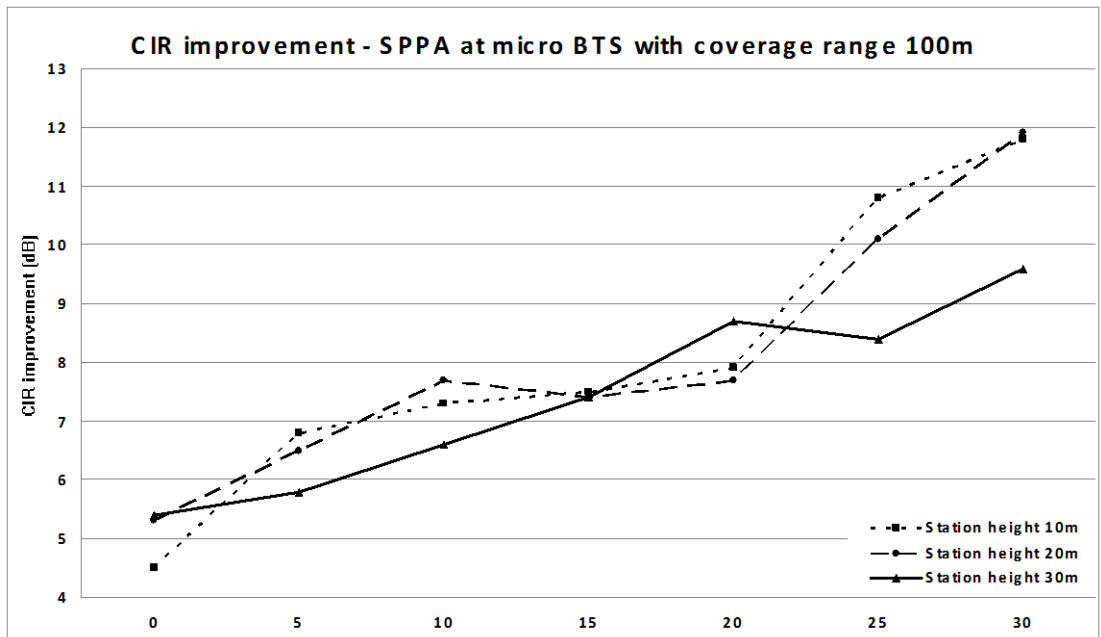
τερματικό σταθμό όσο και στο σταθμό βάσης. Σε όλες τις προσομοιώσεις θεωρήθηκαν οι τέσσερις προαναφερθέντες τύποι σταθμών βάσης: macro, midi, micro και pico.



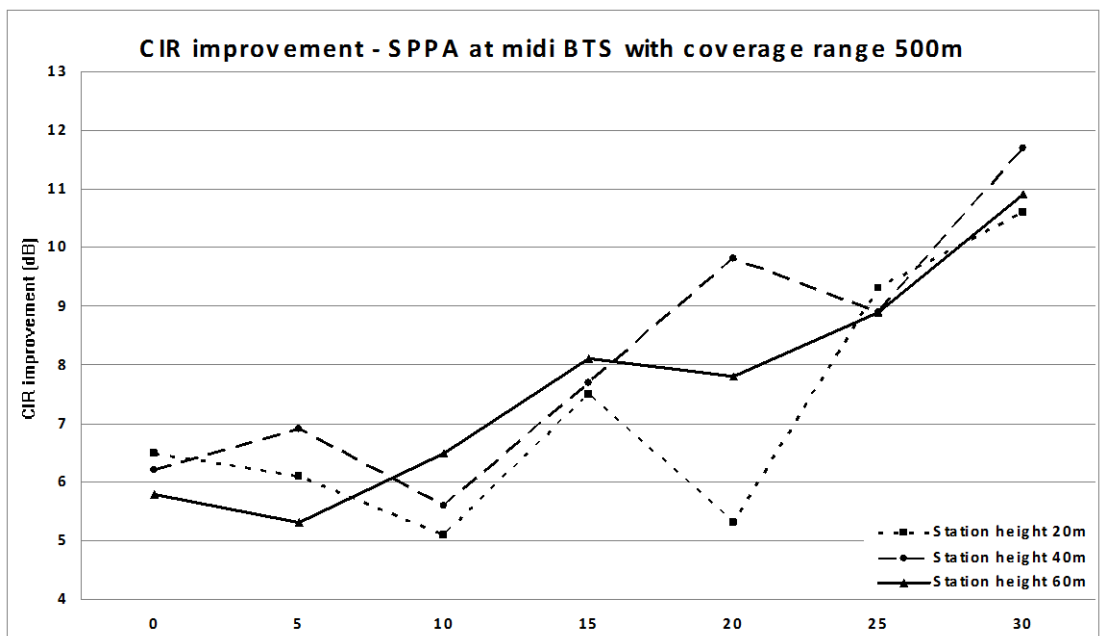
Σχήμα 5.22 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα μόνο στο σταθμό βάσης -περίπτωση macro cell



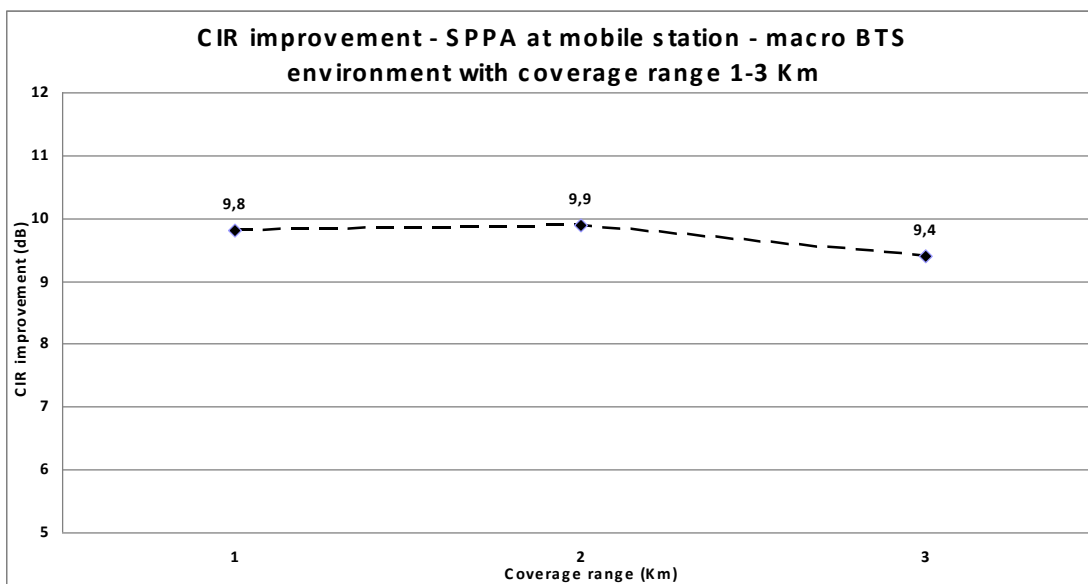
Σχήμα 5.23 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα μόνο στο σταθμό βάσης -περίπτωση pico cell



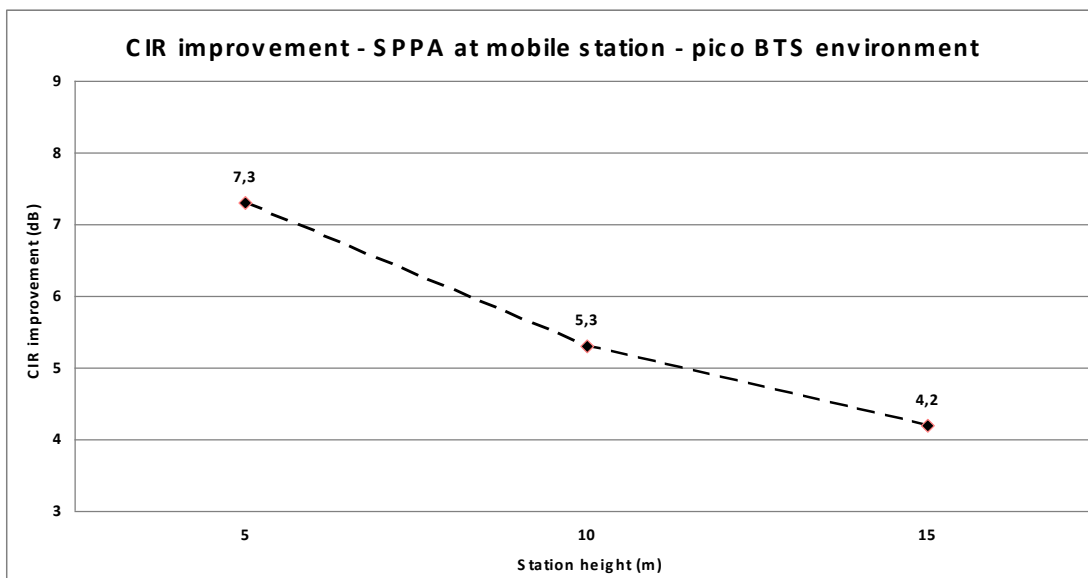
Σχήμα 5.24 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα μόνο στο σταθμό βάσης -περίπτωση micro cell



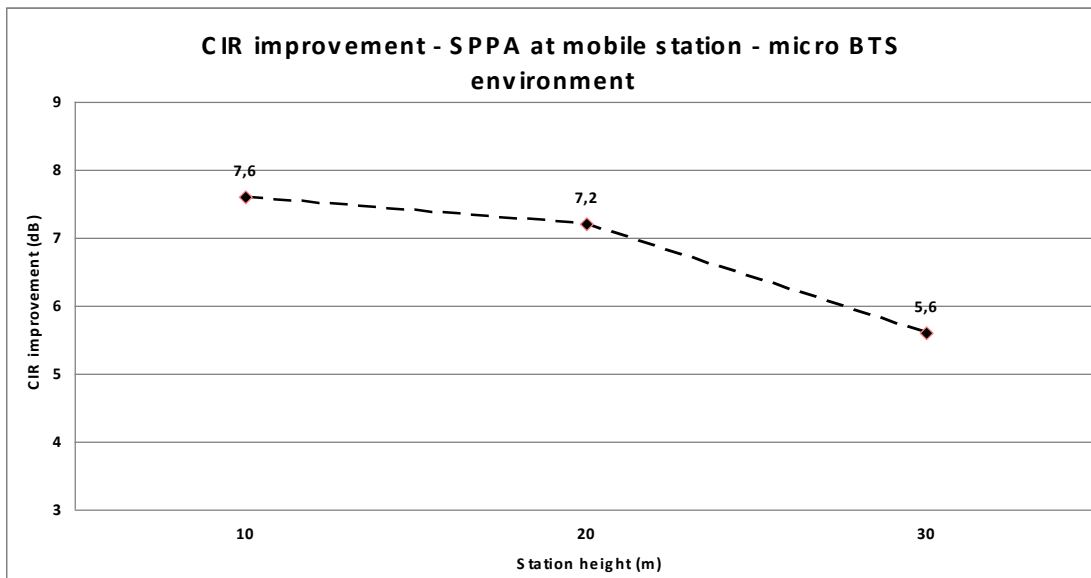
Σχήμα 5.25 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα μόνο στο σταθμό βάσης -περίπτωση midi cell



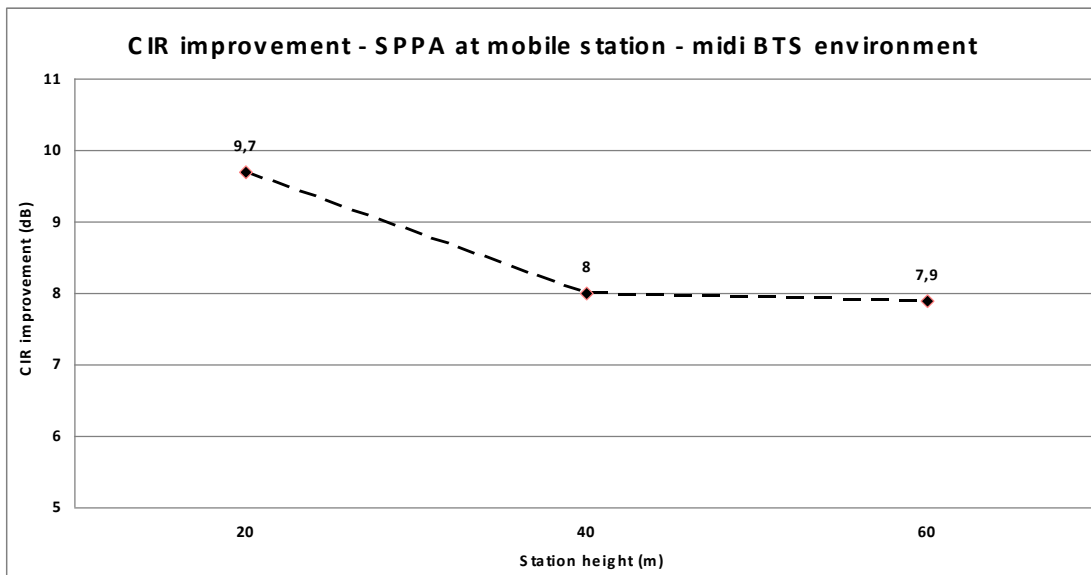
Σχήμα 5.26 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα μόνο στον τερματικό σταθμό - περίπτωση macro cell



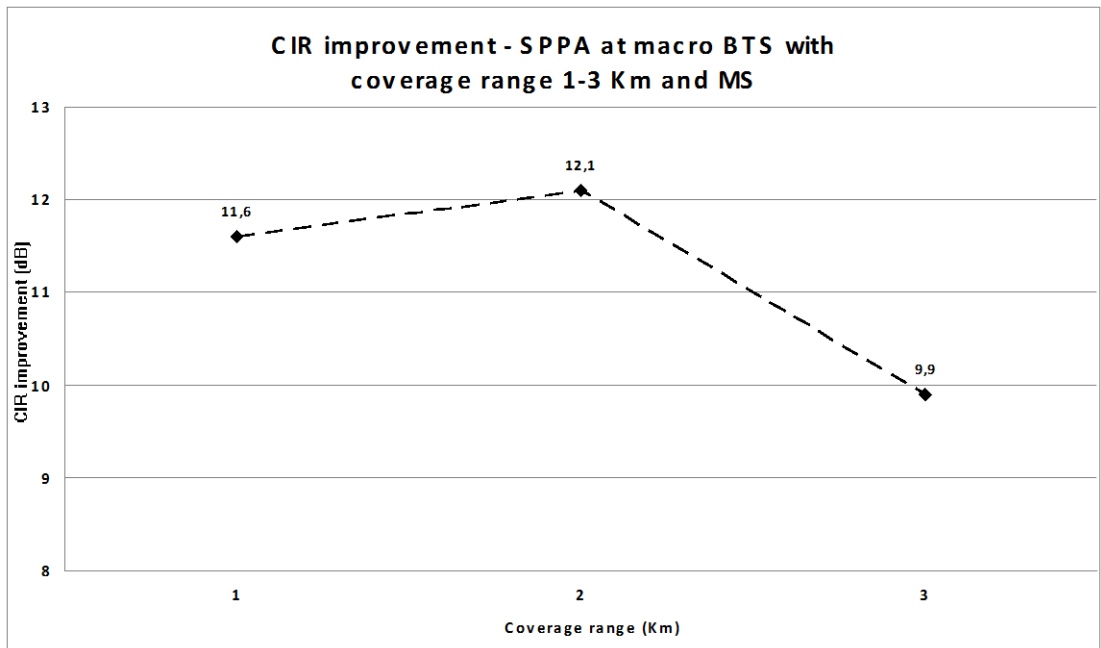
Σχήμα 5.27 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα μόνο στον τερματικό σταθμό - περίπτωση pico cell



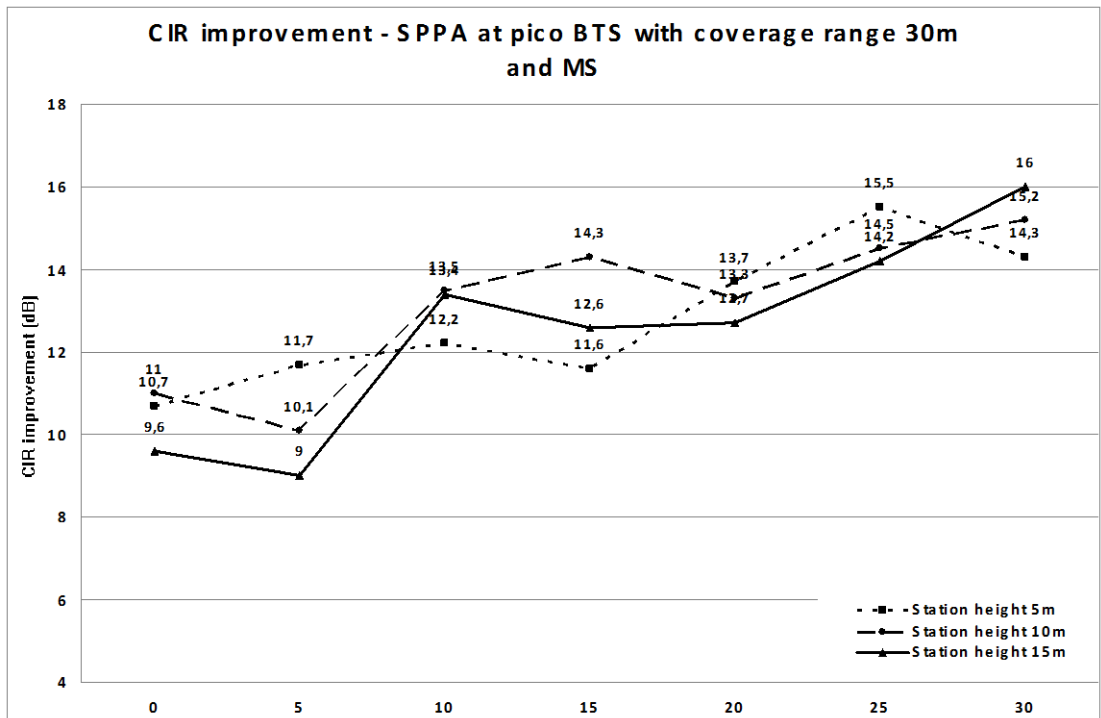
Σχήμα 5.28 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα μόνο στον τερματικό σταθμό - περίπτωση micro cell



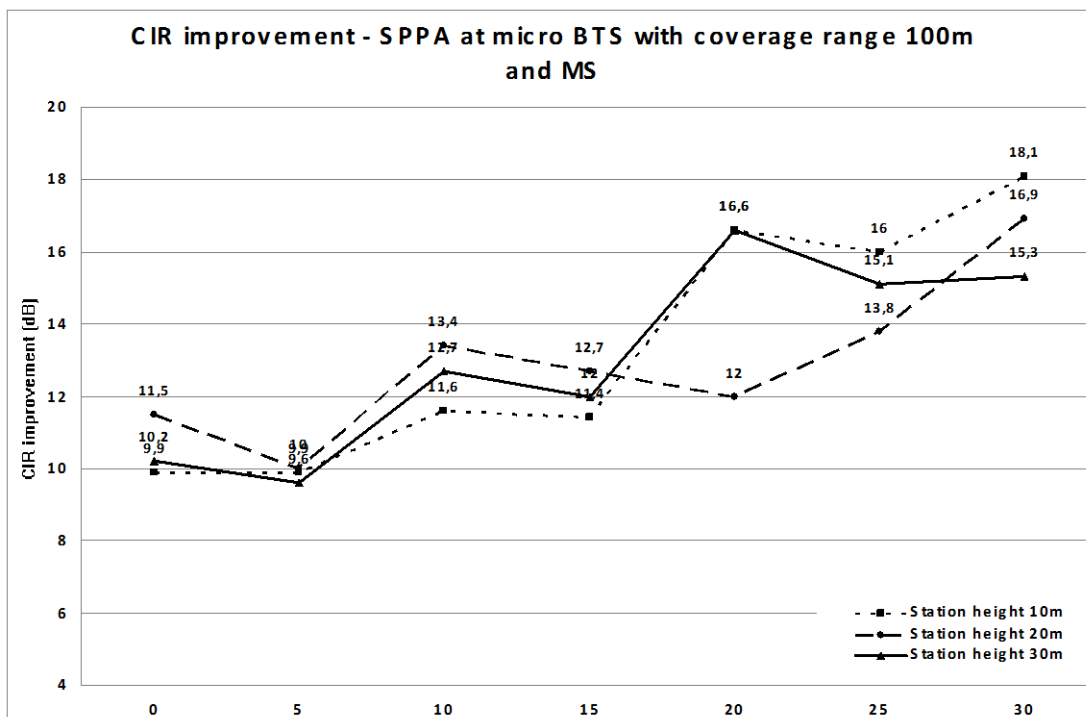
Σχήμα 5.29 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα μόνο στον τερματικό σταθμό - περίπτωση midi cell



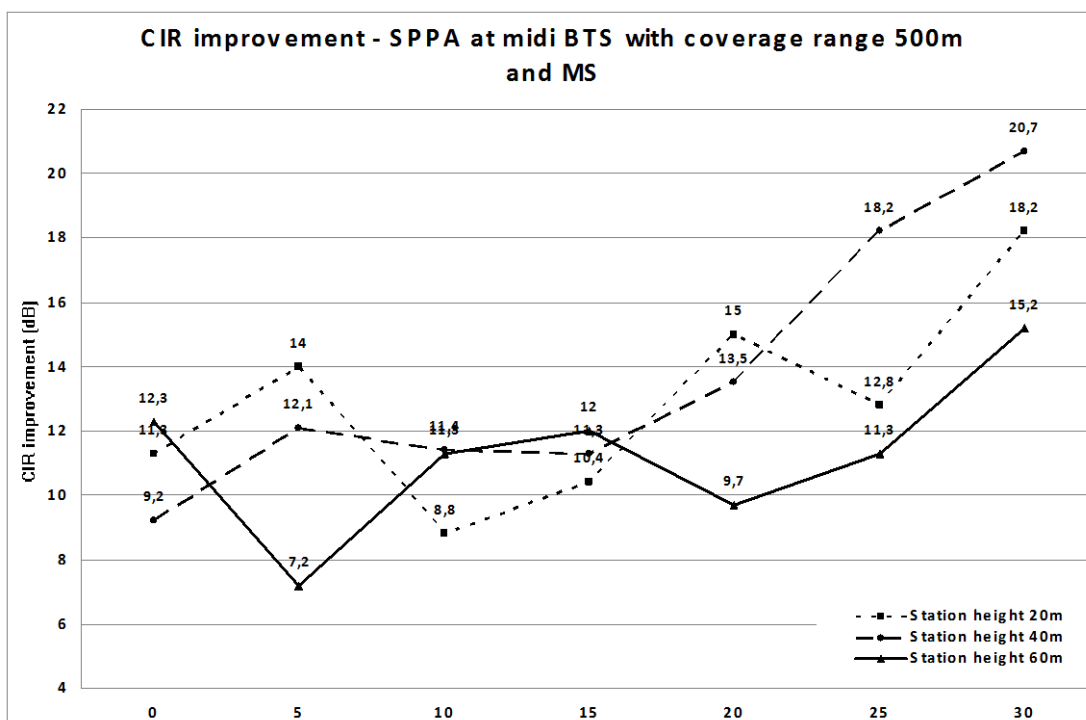
Σχήμα 5.30 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στον τερματικό σταθμό και στο σταθμό βάσης -περίπτωση macro cell



Σχήμα 5.31 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στον τερματικό σταθμό και στο σταθμό βάσης -περίπτωση pico cell



Σχήμα 5.32 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στον τερματικό σταθμό και στο σταθμό βάσης -περίπτωση micro cell



Σχήμα 5.33 Βελτίωση CIR με το κεραιοσύστημα στον τερματικό σταθμό και στο σταθμό βάσης -περίπτωση midi cell

Τα αποτελέσματα των παραγράφων 5.2.4 και 5.2.5 έχουν δημοσιευθεί στο επιστημονικό περιοδικό Progress In Electromagnetics Research B (PIER B), vol.5, pp.303-321, 2008 [18] και στο συνέδριο IEEE International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials, March 2008, Chiba, Japan [19].

### 5.3 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε ένα κεραιοσύστημα ενεργών/παρασιτικών στοιχείων το οποίο και αξιολογήθηκε σε περιβάλλον κυψελωτού τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Το κεραιοσύστημα υποστηρίζει διαμόρφωση έξι (6) δεσμών με επτά (7) ενεργά και παρασιτικά στοιχεία και στόχο είχε την εξάλειψη της επίδρασης των σημάτων παρεμβολής. Τα βασικά χαρακτηριστικά της κεραίας, επιλέχθηκαν σύμφωνα με τις ανάγκες του τηλεπικοινωνιακού συστήματος και ο σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της μεθόδου των γενετικών αλγόριθμων.

Από τις προσομοιώσεις, διαφαίνεται ότι η επίδοση ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος στο οποίο οι σταθμοί βάσεις είναι εξοπλισμένοι με το ευφυές κεραιοσύστημα, είναι σαφώς βελτιωμένη. Η κεραία επιλογής δέσμης, προσφέρει χωρική διακριτότητα μεταξύ επιθυμητών και μη επιθυμητών σημάτων, ενώ ταυτόχρονα απορρίπτει τα σήματα μη ενδιαφέροντος τόσο σε περιβάλλον απλού προσθετικού θορύβου (AWGN) όσο και σε περιβάλλον Rayleigh μιας διαδρομής. Επιπρόσθετα, όταν συγκρίνεται το εν λόγω προτεινόμενο κεραιοσύστημα με απλές συμβατικές κεραίες, ο ρυθμός λαθών BER παρουσιάζεται μειωμένος μέχρι και 50%.

Το κεραιοσύστημα δοκιμάστηκε επίσης σε περιβάλλον 19 σταθμών βάσης και αξιολογήθηκε η βελτίωση που επέρχεται στο λόγο CIR. Η μεγαλύτερη βελτίωση εμφανίζεται όταν το προτεινόμενο κεραιοσύστημα είναι εγκατεστημένο τόσο στο σταθμό βάσης όσο και στον τερματικό σταθμό. Σε αυτές τις περιπτώσεις η βελτίωση του CIR στην ανερχόμενη και στην κατερχόμενη ζεύξη κυμαίνεται από 10 dB μέχρι και 20 dB. Από όλα τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι μια πιθανή αντικατάσταση συμβατικών κεραιοσυστημάτων με ευφυή κεραιοσυστήματα, θα επιφέρει ριζική ποιοτική αλλαγή στην επίδοση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου.

## 5.4 Βιβλιογραφία

- 1 C. A. Balanis, *Antenna theory, analysis and design*, John Wiley and Sons, Third Edition, 2005
- 2 D. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing, First Edition, 1989
- 3 P. K. Varlamos and C. N. Capsalis, “Electronic beam steering using switched parasitic smart antenna arrays”, *Progress in Electromagnetics Research, PIER* 36, pp. 101-109, 2002
- 4 P. K. Varlamos and C. N. Capsalis, “Design of a six-sector switched parasitic planar array using the method of genetic algorithms”, *Wireless Personal Communications*, vol. 26, no. 1, pp. 77-88, August 2003
- 5 ETSI Technical Specification TS 100 910 v8.16.0 (2003-08), *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio transmission and reception (3GPP TS 05.05 version 8.16.0 Release 1999)*
- 6 A. Mehrotra, *GSM system engineering*, Artech House, 1997
- 7 M. Mouly, M. Pautet, *The GSM system for mobile communications*, Cell & Sys Correspondence, 1992
- 8 D. MacKay, *Information Theory, Inference & Learning Algorithms*, Cambridge University Press, 2003
- 9 D. Pauluzzi, N. Beaulieu, “A comparison of SNR estimation techniques for the AWGN channel”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48, issue 10, pp. 1681-1691, 2000
- 10 B. Sklar, “Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part I : Characterization”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 90-100, July 1997
- 11 B. Sklar, “Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part II : Mitigation”, *IEEE Communications Magazine*, pp. 148-155, September 1997
- 12 D.Tse, P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2005
- 13 A.I Sotiriou, P.K Varlamos, P.T Trakadas and C. N. Capsalis, “Performance of a six-beam switched parasitic planar array under one path Rayleigh fading environment”, *Progress in Electromagnetic Research, PIER* 62, pp. 89-106, 2006



- 14 ETSI Technical Specification TS 100 910 v8.16.0 (2003-08), Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio transmission and reception (3GPP TS 05.05 version 8.16.0 Release 1999)
- 15 A. Mehrotra, *GSM system engineering*, Artech House, 1997
- 16 G. Tsoulos, *MIMO System Technology for Wireless Communications*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2006
- 17 E. Biglieri, R. Calderbank, A. Constantinides, A. Goldsmith, A. Paulraj, V. Poor, *MIMO Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2007
- 18 A. I. Sotiriou, P. T. Trakadas and C. N. Capsalis, "Uplink Carrier to Interference improvement in a cellular telecommunication system when a six-beam switched parasitic array is implemented", *Progress In Electromagnetics Research B (PIER B)*, vol.5, pp.303-321, 2008
- 19 A. I. Sotiriou, P. T. Trakadas, C. N. Capsalis, "Carrier-to-Interference improvement in a cellular telecommunications system using switched parasitic planar arrays", *Proceedings of 2008 IEEE International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials*, pp. 546-549, March, 2008, Chiba, Japan







## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΕΠΙΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΜΕ ΕΝΕΡΓΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΕ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΣΗΜΕΙΟΥ ΠΡΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΣΗΜΕΙΑ

#### 6.1 Δίκτυα ασύρματης πρόσβασης

Σε ένα συμβατικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο το μεγαλύτερο μέρος των συνδρομητών συνδέεται με το τοπικό συνδρομητικό κέντρο με ζεύγος καλωδίων χαλκού. Οι μεγαλύτεροι πελάτες μπορεί να χρησιμοποιήσουν εναλλακτικά οπτική ίνα ή μικροκυματική ζεύξη σημείου προς σημείο (point-to-point). Όλο αυτό το δίκτυο των συνδέσεων αποτελεί το δίκτυο τοπικής πρόσβασης (local access network) το οποίο υποδιαιρείται σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης: ενσύρματο δίκτυο πρόσβασης και ασύρματο δίκτυο πρόσβασης. Τα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης στενής ζώνης υποστηρίζουν τηλεφωνικές υπηρεσίες φωνής και τη μετάδοση δεδομένων σε χαμηλές ταχύτητες μέχρι 64kbit/s. Συχνά αναφέρονται και ως ασύρματος τοπικός βρόχος (Wireless in the Local Loop, WLL). Τα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης εξασφαλίζουν πολύ υψηλότερους ρυθμούς, της τάξης αρκετών Mbit/s και επειδή είναι ψηφιακά μπορούν να μεταφέρουν ένα ευρύ φάσμα ηλεκτρονικών σημάτων, όπως φωνή, δεδομένα υψηλής ταχύτητας, τηλεόραση και άλλα πολυμέσα [1].

Ο σταθμός βάσης του φορέα εγκαθίσταται σε κατάλληλο κτίριο και επικοινωνεί με τον εξοπλισμό των συνδρομητών της γειτονικής περιοχής (point-to-multipoint). Κατά τη διάρκεια μίας επικοινωνίας το ασύρματο σύστημα ελέγχου αφιερώνει ένα αντίστοιχο κανάλι. Όταν η μετάδοση τερματίζεται, το κανάλι ελευθερώνεται για να χρησιμοποιηθεί από άλλο τερματικό συνδρομητή. Το εύρος του καναλιού που θα χρησιμοποιηθεί είναι ανάλογο της χρήσης. Έτσι, ένα κανάλι στενού εύρους ζώνης θα δοθεί για μία τηλεφωνική κλήση, αλλά ένα κανάλι ευρείας ζώνης θα χρησιμοποιηθεί για μία σύνδεση υψηλής ταχύτητας όπως για παράδειγμα υπηρεσίες video κλήσης. Με αυτό τον τρόπο το φάσμα αξιοποιείται πιο αποτελεσματικά από τη σύνδεση σημείου προς σημείο και, επιπλέον, πιο οικονομικά.

Λόγω του μεγάλου κόστους ανάπτυξης δικτύων πρόσβασης, ο ανταγωνισμός στον τοπικό βρόχο εξελίσσεται με βραδύ ρυθμό. Σε πολλές χώρες της Ευρώπης, η

κατάσταση βελτιώνεται με την αναβάθμιση και ανάπτυξη των δικτύων καλωδιακής τηλεόρασης. Στα πλεονεκτήματα της ασύρματης πρόσβασης συμπεριλαμβάνονται το εν δυνάμει χαμηλότερο κόστος από ένα ενσύρματο δίκτυο και το μικρότερο χρόνο υλοποίησης και ανάπτυξης δικτύου [2-3].

Η αγορά της σταθερής ασύρματης πρόσβασης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως εξής [4]:

1. Φωνή και συστήματα δεδομένων χαμηλής ταχύτητας (περιορισμένο εύρος ζώνης – narrowband). Η κύρια βάση πελατών φαίνεται να είναι η αγορά οικιακών χρηστών (residential market).
2. Υπηρεσίες τύπου ISDN (μεσαίο εύρος ζώνης). Η αγορά θα αποτελείται κυρίως από εμπορικούς πελάτες μικρών και μεσαίων επιχειρήσεων.
3. Ευρυζωνικές αλληλεπιδραστικές υπηρεσίες (πολύ ευρύ φάσμα – broadband), όπως γρήγορη πρόσβαση στο Διαδίκτυο, υπηρεσίες τοπικού δικτύου, ταχεία μετάδοση αρχείων και δεδομένων, τηλεδιάσκεψη, τηλεϊατρική και αλληλεπιδραστικές υπηρεσίες πολυμέσων. Προβλέπεται ότι η αρχική κίνηση θα είναι περίπου συμμετρική ενώ γρήγορα θα εξελιχθεί σε έντονα ασύμμετρη.

## **6.2 Τοπικά ασύρματα δίκτυα υπολογιστών**

Τα τοπικά ασύρματα δίκτυα υπολογιστών Wireless Local Area Networks (WLAN) είναι δίκτυα που επιτρέπουν την ασύρματη πρόσβαση υπολογιστικών συσκευών στο Διαδίκτυο (internet) ή σε ένα κλειστό εταιρικό δίκτυο (intranet). Οι συσκευές που συνδέονται σε ένα WLAN μπορεί να είναι είτε σταθεροί υπολογιστές (desktop computers), είτε φορητοί (laptops) είτε Personal Digital Assistants (PDAs). Τα δύο βασικότερα μέρη ενός WLAN είναι το Σημείο Πρόσβασης (Access Point) που είναι το σημείο διασύνδεσης του τοπικού ασύρματου δικτύου με τον «έξω κόσμο» δηλαδή το διαδίκτυο ή κάποιο άλλο ενσύρματο δίκτυο, και η Κάρτα Ασύρματης Πρόσβασης (Wireless Access Card) που είναι η κάρτα που λειτουργεί ως διεπαφή (interface) μεταξύ της τερματικής συσκευής και του σημείου πρόσβασης. Με τη χρήση των WLAN ο χρήστης μπορεί να κινείται από το ένα σημείο στο άλλο μέσα σε

ένα περιορισμένο χώρο και να διατηρεί τη σύνδεση του με το δίκτυο με υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων.

Υπάρχουν τα παρακάτω πρότυπα (standards) που αφορούν τη λειτουργία των WLAN και περιγράφονται συνοπτικά:

### 6.2.1 IEEE 802.11b

Είναι το πρότυπο που χρησιμοποιείται σήμερα παγκοσμίως. Λειτουργεί στην ζώνη συχνοτήτων ISM (Industrial Scientific Medical) 2.4-2.5 GHz και επιτρέπει τη μεταφορά δεδομένων με ταχύτητες μέχρι 11 Mbps σε αποστάσεις μέχρι 100 μέτρα από το σημείο πρόσβασης. Η ταχύτητα αυτή είναι συγκρίσιμη με την ταχύτητα των τοπικών ενσύρματων δικτύων υπολογιστών τα οποία στην πλειοψηφία τους λειτουργούν με την τεχνολογία Ethernet που επιτρέπει ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων μέχρι 100 Mbps.

Από την οικογένεια των προτύπων 802 της IEEE, το 802.11 που εγκρίθηκε το 1997 αναφέρεται σε ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών (WLAN) και συγκεκριμένα στο Medium Access Control (MAC) και Physical Layer (PHY) specifications. Το πρότυπο αυτό που τροποποιήθηκε το 1999, ορίζει το πρωτόκολλο διασύνδεσης εξοπλισμού ανταλλαγής δεδομένων στον αέρα, είτε σε ραδιοσυχνότητες (RF) είτε με υπέρυθρη ακτινοβολία, χρησιμοποιώντας το Carrier Sense Multiple Access protocol με Collision Avoidance (CSMA/CA). Περιλαμβάνει υπηρεσίες:

- Επαλήθευσης (authentication)
- Συσχέτισης (association): Συσχέτιση είναι η υπηρεσία που χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση χαρτογράφησης/mapping μεταξύ Σταθμού και Σημείου Πρόσβασης και είναι αντίστοιχη της επιλογής κυψέλης/cell selection στην κυψελωτή τηλεφωνία
- Επανασυσχέτισης (reassociation): Η επανασυσχέτιση χρησιμοποιείται για τη μεταφορά μίας υπάρχουσας συσχέτισης από ένα Σημείο Πρόσβασης σε ένα άλλο, αντίστοιχη της επανεπιλογής κυψέλης -cell reselection στο GSM. Επίσης παρέχει τη δυνατότητα αλλαγής παραμέτρων για μία υπάρχουσα συσχέτιση με Σημείο Πρόσβασης

- Δυνατότητα κρυπτογράφησης-αποκρυπτογράφησης
- Έλεγχο ισχύος εκπομπής (power management) για μείωση της κατανάλωσης στους κινητούς σταθμούς.

Οι δύο υλοποιήσεις, με RF και υπέρυθρο, υποστηρίζουν ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 1 και 2 Mbps.

Το Νοέμβριο του 1999 η IEEE ενέκρινε ένα καινούριο πρότυπο που ονομάστηκε 802.11b και επέτρεπε, στο Physical Layer, μετάδοση δεδομένων με ταχύτητα 11 Mbps. Ο καθαρός όγκος μετάδοσης δεδομένων (data throughput) μετά το επίβαρο πακέτου (packet overhead) ήταν περίπου 6-7 Mbps. Αυτό το πρότυπο κίνησε το ενδιαφέρον της αγοράς που μέχρι τότε θεωρούσε τα Wireless LANs ασύμφορα για τις ταχύτητες που προσέφεραν και έτσι ξεκίνησε με γρήγορους ρυθμούς η ανάπτυξη του hardware που το υποστήριζε. Εταιρείες όπως η Compaq, Nokia, Nortel, 3Com και CISCO ενώ άλλες όπως η Lucent, Proxim και Breezecom ήταν οι πρώτες που απέκτησαν οικονομικά οφέλη από τη συγκεκριμένη τεχνολογία. Από την αρχή οι εταιρείες που υλοποίησαν το πρότυπο, συνειδητοποίησαν τη σημασία της διαλειτουργικότητας μεταξύ των προϊόντων των διάφορων κατασκευαστών και με αυτό το σκεπτικό ιδρύθηκε η WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance) η οποία παρέχει την πιστοποίηση Wi-Fi (Wireless Fidelity) σε όσα προϊόντα ακολουθούν το πρότυπο 802.11b.

Στις ακόλουθες παραγράφους γίνεται μια σύντομη περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών του 802.11b [4-8].

#### 6.2.1.1 Περιγραφή-γενικές αρχές.

Ένα δίκτυο WLAN αποτελείται από Σημεία Πρόσβασης (που είναι το αντίστοιχο του BTS στο GSM) και ηλεκτρονικούς υπολογιστές εξοπλισμένους με PCI cards (Wireless Network Interface Cards – NIC's) που υποστηρίζουν σύνδεση με δίκτυο WLAN (αντίστοιχο των κινητών τηλεφώνων στο GSM). Τα Σημεία Πρόσβασης είναι συνδεδεμένα στο Internet (είτε απευθείας είτε μέσω wired LAN) για τη διεκπεραίωση της κίνησης από και προς τους χρήστες.



Το πρότυπο 802.11b της IEEE χρησιμοποιεί τη ζώνη συχνοτήτων 2.4 GHz με εύρος 83.5 MHz (2.4-2.4835 GHz) η οποία χρησιμοποιείται διεθνώς χωρίς αδειοδότηση ως Βιομηχανική-Επιστημονική-Ιατρική ζώνη συχνοτήτων (ISM: Industrial-Science-Medicine band). Την ίδια ζώνη συχνοτήτων χρησιμοποιούν και άλλες ασύρματες τεχνολογίες όπως το Bluetooth, ασύρματα τηλέφωνα, ραδιοερασιτέχνες στα βραχεία και φούρνοι μικροκυμάτων, τα οποία είναι δυνατό να προκαλέσουν παρεμβολές. Για την αντιμετώπιση ανεπιθύμητων παρεμβολών χρησιμοποιείται από το 802.11b η μέθοδος DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) με την οποία τα δεδομένα πολλαπλασιάζονται με μία ακολουθία ψευδοτυχαίων δεδομένων υψηλότερου ρυθμού (chips) με αποτέλεσμα την διεύρυνση του εκπεμπόμενου φάσματος συχνοτήτων και μείωση των παρεμβολών. Στη συνέχεια ακολουθεί διαμόρφωση του σήματος με τη μέθοδο Complimentary Code Keying (CCK) και εκπομπή σε φέρουσα συχνότητα. Με τη μέθοδο DSSS το εκπεμπόμενο φάσμα απλώνεται (spread spectrum) στο χώρο των συχνοτήτων με ταυτόχρονη μείωση της μέγιστης τιμής εκπεμπόμενης ισχύος. Συγκεκριμένα το εύρος ζώνης (bandwidth) για τα συστήματα DSSS είναι περίπου 20 MHz, με αποτέλεσμα την ύπαρξη τριών μόνο (μη αλληλεπικαλυπτόμενων) καναλιών εκπομπής στη δεδομένη ζώνη συχνοτήτων από 2.4-2.48 GHz.

Όπως προαναφέρθηκε το πρότυπο IEEE 802.11b χρησιμοποιεί τη μέθοδο Carrier Sense Multiple Access protocol με Collision Avoidance (CSMA/CA). Multiple Access επειδή όλα τα σημεία (nodes) του δικτύου μοιράζονται το ίδιο φυσικό μέσο (φέρουσα συχνότητα). Carrier Sense διότι πριν την εκπομπή, κάθε πομποδέκτης παρακολουθεί το δίκτυο για να διαπιστώσει αν η συγκεκριμένη φέρουσα χρησιμοποιείται και αναβάλλει την εκπομπή έως ότου ελευθερωθεί. Όταν ελευθερωθεί η συχνότητα κάθε σταθμός εισέρχεται σε περίοδο «τυχαίας αναμονής» (random back off period) με σκοπό την αποφυγή του φαινομένου πολλοί σταθμοί να καταλαμβάνουν τη συχνότητα αμέσως μετά την ολοκλήρωση της προηγούμενης εκπομπής. Επίσης το πρότυπο IEEE 802.11b περιλαμβάνει μηχανισμό για την αποφυγή συγκρούσεων στη φέρουσα συχνότητα (Collision Avoidance).

#### 6.2.1.2 Ασφάλεια δεδομένων

Το θέμα της ασφάλειας δεδομένων έχει συζητηθεί αρκετά για το συγκεκριμένο πρότυπο. Το IEEE 802.11b χρησιμοποιεί, προαιρετικά, τον αλγόριθμο

κρυπτογράφησης WEP (Wired Equivalent Privacy) ο οποίος έχει σχεδιαστεί για να παρέχει ασφάλεια δεδομένων ισοδύναμη με αυτή που παρέχει ένα καλωδιωμένο LAN. Ο αλγόριθμος δεν είναι σχεδιασμένος ως η αποκλειστική μέθοδος για την ασφάλεια δεδομένων και σύμφωνα με την ερευνητική ομάδα του University Of California, Berkeley είναι σχετικά εύκολο να παρακαμφθεί. Η ερευνητική ομάδα του UC Berkeley ισχυρίζεται ότι κατάφερε πλησιάζοντας στον εξωτερικό χώρο εταιρειών που είχαν εγκαταστήσει WLAN's να υποκλέψει δεδομένα που μεταδίδονταν στο δίκτυο των εταιρειών. Πιο συγκεκριμένα το WEP χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο κρυπτογράφησης RC4 και βασίζεται στη χρησιμοποίηση ενός μυστικού κλειδιού  $k$  που μοιράζονται οι σταθμοί του δικτύου. Τα στάδια της κρυπτογράφησης έχουν ως εξής:

A. Αρχικά υπολογίζεται το CRC integrity checksum  $c(M)$  του μηνύματος  $M$  το οποίο συνενώνεται με το μήνυμα  $M$  για τη δημιουργία του plaintext:

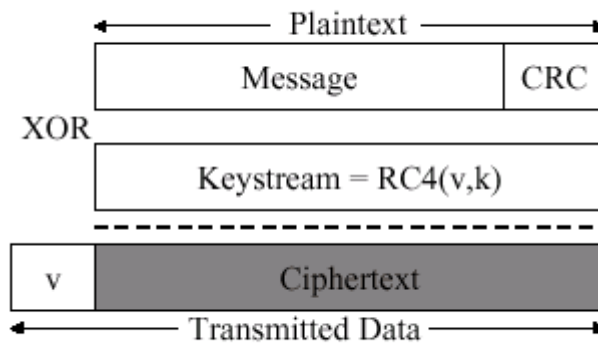
$$P=(M, c(M)).$$

Το checksum είναι ανεξάρτητο του κλειδιού  $k$ . Το plaintext αποτελεί την είσοδο στο επόμενο στάδιο.

B. Επιλέγεται ένα initialization vector (IV)  $v$ . Ο αλγόριθμος RC4 δημιουργεί χρησιμοποιώντας το  $v$  και το  $k$  ένα ψευδοτυχαίο keystream  $RC4(v,k)$ . Αυτό συνδυάζεται με XOR με το plaintext για τη δημιουργία του κρυπτογραφημένου μηνύματος (ciphertext):

$$C=P\oplus RC4(v,k).$$

Γ. Εκπέμπεται το initialization vector  $v$  (μη κρυπτογραφημένο) και το ciphertext  $C$  στη φέρουσα συχνότητα. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 6.1:



Σχήμα 6.1. Δομή κρυπτογραφημένου πλαισίου WEP

Στην αποκρυπτογράφηση ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή παράγεται το keystream από το  $v$  και το  $k$  και συνδυάζεται με XOR με το ciphertext για την αναδημιουργία του plaintext. Στη συνέχεια ο δέκτης υπολογίζει το checksum από το μήνυμα και το συγκρίνει με το ληφθέν checksum και μόνο εφόσον ταιριάζουν αποδέχεται το μήνυμα. Σημειώνεται ότι το initialization vector είναι διαφορετικό για κάθε πακέτο ενώ το κλειδί  $k$  είναι κοινό για όλα και γνωστό σε κάθε σταθμό. Γι' αυτό το λόγο το  $v$  εκπέμπεται μη κρυπτογραφημένο με κάθε πακέτο, ώστε να μπορεί ο δέκτης να αναπαράγει το keystream. Το WEP αποσκοπεί:

- A. Στην εμπιστευτικότητα (αποφυγή υποκλοπών) των μεταδιδόμενων δεδομένων.
- B. Στον έλεγχο πρόσβασης, με τη δυνατότητα απόρριψης πακέτων που δεν είναι κρυπτογραφημένα με WEP.
- Γ. Στην ακεραιότητα (integrity) των δεδομένων με τη χρησιμοποίηση του checksum.

Η ασφάλεια της μεθόδου βασίζεται στη δυσκολία εύρεσης του μυστικού κλειδιού  $k$ . Υπάρχουν δύο υλοποιήσεις με κλειδιά 40-bit ή 128-bit. Τα συστήματα που χρησιμοποιούν κλειδιά 40-bit είναι πρακτικά δυνατό να «σπάσουν» με λογικές απαιτήσεις σε υπολογιστικά μέσα, ενώ τα άλλα των 128-bit καθιστούν πρακτικά αδύνατη μια τέτοια περίπτωση. Ωστόσο η ομάδα του UC Berkeley ισχυρίζεται ότι δεν

είναι απαραίτητο το σπάσιμο/εύρεση του μυστικού κλειδιού  $k$ , οπότε ούτε τα συστήματα που χρησιμοποιούν κλειδί 128-bit είναι ασφαλή.

Ένας τρόπος «επίθεσης» έγκειται στην επαναχρησιμοποίηση από το σύστημα του ίδιου keystream για την κρυπτογράφηση δύο μηνυμάτων. Συνδυάζοντας τα δύο κρυπτογραφημένα μηνύματα με XOR, το keystream απλοποιείται και απομένει ο συνδυασμός XOR των δύο plaintext μηνυμάτων. Με διάφορες τεχνικές που έχουν προταθεί και απαιτούν κάποιο όγκο υπολογισμών, είναι δυνατή η εύρεση των αρχικών μηνυμάτων από το XOR τους. Το πρόβλημα γίνεται πιο απλό όταν είναι γνωστοί περισσότεροι από δύο συνδυασμοί XOR μηνυμάτων.

Μία άλλη αδυναμία του WEP έγκειται στη γραμμικότητα του CRC checksum που χρησιμοποιείται για την επιβεβαίωση της ακεραιότητας των δεδομένων. Λόγω αυτής της γραμμικότητας είναι δυνατό, με κατάλληλη παρεμβολή, να αλλοιωθεί το περιεχόμενο ενός εκπεμπόμενου μηνύματος με τρόπο ώστε να παράγεται checksum ίδιο με εκείνο του αρχικού, με συνέπεια να μη μπορεί να ανιχνευθεί η αλλοίωση αυτή από το δέκτη του μηνύματος. Αυτή η δυνατότητα μπορεί ενδεχομένως να χρησιμοποιηθεί ως εξής: Στην περίπτωση που ένα Σημείο Πρόσβασης λειτουργεί και ως Internet Router και προωθεί (μη κρυπτογραφημένα) δεδομένα στο Internet (με πρωτόκολλο IP), μπορεί να παραχαραχθεί η διεύθυνση IP του παραλήπτη στο πακέτο, έτσι ώστε αυτό να σταλεί σε Internet host που ελέγχεται από τον υποκλοπέα. Σε αυτή την περίπτωση ο υποκλοπέας θα έχει πλέον αποκρυπτογραφημένο το μήνυμα που είχε σταλεί.

Μέτρα προφύλαξης:

1. Τοποθέτηση του WLAN εκτός του firewall της εταιρείας-οργάνωσης, έτσι ώστε η επικοινωνία του WLAN με το Internet να ελέγχεται από το firewall.
2. Βελτίωση της μεθόδου χρήσης του ίδιου μυστικού κλειδιού από τους σταθμούς (αποφυγή χρησιμοποίησης του ίδιου κλειδιού από όλους τους σταθμούς).

Επίσης επόμενες εκδόσεις του προτύπου IEEE 802.11b θα περιλαμβάνουν βελτίωση του υπάρχοντος αλγορίθμου κρυπτογράφησης (RC-4) καθώς και νέο σχήμα κρυπτογράφησης βασισμένο και πάλι στον ίδιο αλγόριθμο.

Εταιρείες όπως οι Cisco και η Orinoco, αναγνωρίζοντας τα ενδεχόμενα προβλήματα με την ασφάλεια δεδομένων, προσφέρουν λύσεις για WLAN που εμπεριέχουν αυτόματη δημιουργία κλειδιού κρυπτογράφησης και διανομή βελτιωμένων κλειδιών διαφορετικά για κάθε σύνοδο (session).

#### 6.2.1.3 Ταχύτητα μετάδοσης

Η ονομαστική (nominal) ταχύτητα του IEEE 802.11b είναι 11 Mbps αλλά η πραγματική διεκπεραιωσιμότητα δεδομένων αφού αφαιρεθεί το επίβαρο πακέτου είναι περίπου 6-7 Mbps. Η ακριβής τιμή της ταχύτητας εξαρτάται από τον αριθμό των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι σε ένα Σημείο Πρόσβασης καθώς και την απόσταση από αυτό.

#### 6.2.1.4 Κάλυψη

Οι τιμές για την κάλυψη του WLAN που έχουν δώσει οι εταιρείες που προσφέρουν τέτοιες λύσεις στην αγορά, κυμαίνονται από 450μ. (όπως έχει ισχυριστεί η Symbol) έως 50μ. (που δίνει η Linksys για κάλυψη εσωτερικών χώρων) με άλλες εταιρείες να βρίσκονται ανάμεσα στα δύο άκρα. Μια τυπική τιμή κάλυψης που υποστηρίζει την υψηλότερη δυνατή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων μπορεί να θεωρηθεί εκείνη των 60μ. Η ποιότητα της σύνδεσης εξαρτάται φυσικά από τη μορφή του χώρου όπου είναι εγκατεστημένο το δίκτυο, το υλικό κατασκευής του κτιρίου, τυχόν εμπόδια που παρεμβάλλονται στη διαδρομή κτλ.

#### *6.2.2 Bluetooth*

Στη συγκεκριμένη παράγραφο γίνεται σύντομη περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών του Bluetooth [9-10]. Το Bluetooth (που πήρε το όνομά του από έναν βασιλιά της Δανίας της αρχαιότητας) είναι τεχνολογία που φιλοδοξεί να καταργήσει τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση ηλεκτρονικών συσκευών μεταξύ τους όπως τα PDA's, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, ψηφιακές κάμερες και κινητά τηλέφωνα που βρίσκονται σε αποστάσεις όχι μεγαλύτερες των 10 μέτρων χωρίς την αναγκαιότητα οπτικής επαφής. Εφαρμογές της τεχνολογίας είναι δυνατό να αποτελέσουν, εκτός του συγχρονισμού δεδομένων μεταξύ προσωπικών ηλεκτρονικών

συσκευών, το αυτόματο check-in σε αεροδρόμια με ταυτόχρονη έκδοση ηλεκτρονικής κάρτας επιβίβασης (σε περίπτωση που δεν υπάρχουν αποσκευές), αυτοματισμός της διαδικασίας ενοικίασης και επιστροφής οχημάτων σε εταιρείες ενοικίασεως κ.ά.

Δεδομένου ότι το Bluetooth δημιουργήθηκε για διαφορετικό σκοπό από το IEEE 802.11b, έχει περιορισμένη εμβέλεια που δεν ξεπερνά τα 10 μέτρα και σχετικά χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, έως 720 KBps. Συνεπώς, δεν μπορεί να θεωρηθεί ανταγωνιστική τεχνολογία για τα WLANs, ωστόσο θεωρείται πιο αξιόπιστο από τις υπέρυθρες συνδέσεις.

Χρησιμοποιεί τη μέθοδο Frequency Hopping σε αντίθεση με το Direct Sequence που χρησιμοποιεί το IEEE 802.11b. Η τεχνολογία αυτή μόλις τα τελευταία χρόνια εμφανίστηκε στην αγορά. Δεδομένου ότι και αυτή λειτουργεί στην ίδια ζώνη συχνοτήτων (2.4-2.48 GHz) είναι δυνατό να δημιουργήσει παρεμβολές στην περίπτωση συνύπαρξης με WLAN. Η περίπτωση αυτή έχει μελετηθεί στη βιβλιογραφία και έχουν εξαχθεί τα ακόλουθα συμπεράσματα:

A. Το ποσοστό παρεμβολής εξαρτάται από τις συνθήκες διάδοσης στο συγκεκριμένο χώρο, την πυκνότητα των Bluetooth piconets, και το φόρτο δεδομένων που διακινείται.

B. Οι παρεμβολές χειροτερεύουν όσο απομακρύνεται κάθε σταθμός από το Σημείο Πρόσβασης (WLAN) με το οποίο είναι συνδεδεμένος.

Γ. Οι παρεμβολές δεν οδηγούν σε σημαντική μείωση της πιστότητας μετάδοσης δεδομένων ακόμη και σε σχετικά πυκνό δίκτυο συσκευών που χρησιμοποιούν την τεχνολογία Bluetooth.

Η παραπάνω μελέτη βασίστηκε στις εξής υποθέσεις:

A. Υιοθετήθηκε μοντέλο διάδοσης που προέβλεπε διάδοση line-of-sight για τα πρώτα 8 μέτρα, ενώ μετά τα 8 μέτρα υποτίθεται path loss της μορφής  $\sim r^{3.3}$

B. Οι παρεμβολές είναι αμελητέες για Signal to Interference Ratio (SIR) μεγαλύτερο των 10 dB

Γενικά εξαιτίας της διαφορετικής χρήσης τους η πιθανότητα συνύπαρξης WLAN και συσκευών Bluetooth στον ίδιο χώρο κρίνεται περιορισμένη.

### 6.2.3 IEEE 802.11a - HiperLAN 2

Δύο άλλα πρότυπα που συζητούνται είναι το IEEE 802.11a [11] και το HiperLAN 2 [12]. Και τα δύο χρησιμοποιούν τη ζώνη συχνοτήτων στα 5 GHz με το πρώτο να έχει μεγαλύτερη διάδοση στην Αμερική και το δεύτερο στην Ευρώπη. Υποστηρίζουν ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων 24-54 Mbps με εμβέλεια μικρότερη του IEEE 802.11b.

Το 1999 δημιουργήθηκε η επέκταση στο αρχικό πρότυπο 802.11 που προβλέπει μετάδοση στη ζώνη συχνοτήτων U-NII των 5GHz με ρυθμούς μετάδοσης 1, 2, 5.5, 11, 6, 12, 24 Mbps και προαιρετικά 36, 48, 54 Mbps χρησιμοποιώντας OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) διαμόρφωση. Η επέκταση αυτή αποσκοπούσε να καλύψει την ανάγκη για μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης. Επιλέχθηκε η λειτουργία σε μια υψηλότερη ζώνη συχνοτήτων, αφενός για να μπορούν να υποστηριχθούν οι μεγαλύτεροι ρυθμοί, αφετέρου ώστε να μην υπάρχει παρεμβολή από τις προηγούμενες συσκευές. Οι αντίστοιχες συσκευές είναι ασύμβατες με αυτές που εργάζονται με το 802.11b, αφού ο τρόπος μετάδοσης, αλλά και οι ραδιοσυχνότητες που χρησιμοποιούνται είναι διαφορετικές. Το IEEE 802.11a προσφέρει οκτώ κανάλια μετάδοσης δεδομένων, συγκρινόμενο με τρία του IEEE 802.11b. Το πρώτο στον κόσμο εγκατεστημένο δίκτυο IEEE 802.11a υπάρχει ήδη στην Αμερική, κατασκευάστηκε από την εταιρεία Proxim και εγκαταστάθηκε στην εταιρεία Covalent Technologies, στο San Fransisco της Καλιφόρνιας. Το IEEE 802.11a μπορεί να συνυπάρχει στον ίδιο χώρο με ένα δίκτυο IEEE 802.11b δεδομένου ότι χρησιμοποιούν διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων και έχει εκφραστεί ή άποψη ότι το 802.11b δεν θα αντικατασταθεί από το 802.11a, αλλά απλώς το δεύτερο θα χρησιμοποιείται σε ορισμένα σημεία όπου απαιτείται ταχύτερη μετάδοση δεδομένων ή για τη διασύνδεση δικτύων 802.11b.

Το HiperLAN 2 (High Performance Radio LAN) εγκρίθηκε από το ETSI (European Telecommunications Standards Institute) με σκοπό αφενός τη δημιουργία ενός συμπληρωματικού μηχανισμού πρόσβασης για συστήματα UMTS και αφετέρου την ιδιωτική χρήση σαν ασύρματο δίκτυο. Συγκεκριμένα υπάρχει η δυνατότητα σε

σημεία όπου απαιτείται μεγάλη χωρητικότητα για παροχή υπηρεσιών 3<sup>ης</sup> γενιάς οι υπηρεσίες αυτές να παρέχονται μέσω του HiperLAN 2. Θα λειτουργεί ως επέκταση των υφιστάμενων ενσύρματων δικτύων αφού οι κόμβοι του θα είναι λειτουργικά ενσωματωμένοι στα ενσύρματα τοπικά δίκτυα. Γενικά κρίνεται ότι η ανάπτυξη του βρίσκεται μερικούς μήνες πίσω από το IEEE 802.11a. Το 802.11a είναι πιο δημοφιλές στις αμερικάνικες εταιρείες ενώ το HiperLAN 2 θα είναι η επιλογή της Ευρώπης αφού θα παρέχει και διαλειτουργικότητα (interoperability) με το UMTS.

#### 6.2.4 HomeRF

Το HomeRF [13-14] δημιουργήθηκε το Μάρτιο του 1997 από το Home Radio Frequency Working Group με σκοπό να προσφέρει υπηρεσίες Wireless LAN στους οικιακούς καταναλωτές. Το HomeRF που λειτουργεί με Frequency Hopping υποστηρίζει προς το παρόν ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων 1.6 Mbps και γι' αυτό το λόγο θεωρείται πρότυπο περιορισμένης χρονικά βιωσιμότητας. Ωστόσο μελλοντικά η ταχύτητα αυτή αναμένεται να αυξηθεί μέχρι τα 20 Mbps μετά το έτος 2002, γεγονός που ίσως δώσει νέα ώθηση στους υποστηρικτές αυτής της τεχνολογίας.

### 6.3 Δίκτυα ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης

Στις ακόλουθες παραγράφους γίνεται ανάλυση των διαφορετικών τύπων δικτύων ασύρματης πρόσβασης που συναντώνται σήμερα. Αναλύονται τα χαρακτηριστικά και η αρχιτεκτονική τους ενώ παράλληλα αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα και οι χώροι εφαρμογής για τον κάθε τύπο.

#### 6.3.1 Δίκτυα WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access

Τα δίκτυα ευρυζωνικής πρόσβασης αποτελούν μία από τις γρηγορότερα ανερχόμενες τεχνολογίες δικτύωσης, σε ένα περιβάλλον που μεταβάλλεται διαρκώς και γι' αυτό, αν οι αντίπαλες τεχνολογίες το επιτρέψουν, μπορεί να οδηγήσει σε αφανισμό όρους που σήμερα θεωρείται ότι ανήκουν στην περίφημη "αιχμή της τεχνολογίας". Ο λόγος για το WiMAX [15], Worldwide Interoperability for Microwave Access, Παγκόσμια Διεφαρμογή για την Μικροκυματική Πρόσβαση, το οποίο αποτελεί την μητροπολιτική εκδοχή του γνωστού μας τοπικού ασύρματου



δικτύου τύπου Wi-Fi. Βασικός στόχος της δημιουργίας δικτύων ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης είναι να γίνει δυνατή η πρόσβαση στο διαδίκτυο από οποιοδήποτε σημείο μιας "δικτυωμένης" πόλης.

Η τεχνολογία WiMAX, η οποία παρουσιάζεται κατ' αρχάς ελκυστική ως εναλλακτική λύση στις ενσύρματες συνδέσεις, καλωδιακές και DSL, γίνεται ακόμη πιο ενδιαφέρουσα όταν γίνει αντιληπτό ότι δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης με το διαδίκτυο όχι μόνο σε υπολογιστές αλλά και σε κάθε είδους έξυπνες συσκευές (κινητά τηλέφωνα, ηλεκτρονικές ατζέντες, συσκευές δορυφορικού συστήματος πλοήγησης - GPS ή ακόμη και ψηφιακές κάμερες). Αν και από πλευράς λειτουργικότητας η τεχνολογία WiMAX μοιάζει με την συνηθισμένη ασύρματη δικτύωση Wi-Fi, η υλοποίηση της έχει σημαντικές διαφορές. Προφανώς, η σημαντικότερη διαφορά είναι ότι το WiMAX παρέχει συνδέσεις εύρους δεκάδων χιλιομέτρων, ενώ το Wi-Fi περιορίζεται σε εμβέλεια μερικών εκατοντάδων μέτρων. Γίνεται αντιληπτό ότι η περιοχή κάλυψης με τις δυο προαναφερθείσες τεχνολογίες παρουσιάζει μεγάλη διαφορά. Όμως τα πλεονεκτήματα του WiMAX δεν σταματούν εδώ. Η χρήση ενός εξελιγμένου συστήματος χρονοδρομολόγησης στους σταθμούς πρόσβασης WiMAX, τους καθιστά αποδοτικότερους στην περίπτωση πολλαπλών συνδέσεων αλλά και ικανότερους στο να παρέχουν σταθερή ποιότητα σύνδεσης. Αυτό τους κάνει καταλληλότερους για τη μετάδοση φωνητικών υπηρεσιών και διαδικτυακής τηλεόρασης.

Τα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας WiMAX καθιστούν για πρώτη φορά εφικτή την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών στο ευρύ κοινό "en κινήσει". Μέχρι σήμερα, οι περιορισμένες δυνατότητες των δικτύων κινητής τηλεφωνίας καθιστούσαν ιδιαίτερα δύσκολη την πρόσβαση σε ευρυζωνικές υπηρεσίες όταν κάποιος βρισκόταν εκτός γραφείου, τόσο λόγω των αργών ταχυτήτων όσο και λόγω των ιδιαίτερα υψηλών χρεώσεων. Ως αποτέλεσμα αυτών των περιορισμών, οι σχετικές δυνατότητες των κινητών τηλεφώνων ή των ειδικών καρτών απομακρυσμένης πρόσβασης μέσω του φορητού υπολογιστή, χρησιμοποιούνται ελάχιστα και κυρίως από επαγγελματίες χρήστες που δεν έχουν άλλη επιλογή ή που τα έξοδά τους καλύπτονται από τον εργοδότη τους. Το πλαίσιο αυτό θα αλλάξει ριζικά με την εξάπλωση του WiMAX.

Πολλές εταιρίες ενδιαφέρονται ήδη για την ανάπτυξη και εμπορική αξιοποίηση δικτύων WiMAX. Οι εταιρίες παροχής διαδικτυακών υπηρεσιών εξετάζουν την δυνατότητα χρησιμοποίησης της τεχνολογίας για την παροχή ευρυζωνικής σύνδεσης στο "τελευταίο μίλι" του δικτύου τους, δηλαδή το τελικό

τμήμα του δικτύου τους, αυτό που φτάνει άμεσα στον πελάτη τους. Με αυτό τον τρόπο θα γίνει εφικτή η παροχή ευρυζωνικών συνδέσεων σε συμφέρουσες τιμές σε περιοχές όπου η ενσύρματη δικτύωση είναι προβληματική ή οικονομικά ασύμφορη. Για τους ίδιους ακριβώς λόγους, τα δίκτυα WiMAX αναμένεται να χρησιμοποιηθούν ευρέως στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου οι ενσύρματη υποδομή είναι κακής ποιότητας ή ανύπαρκτη, εφόσον αποτελούν μια χαμηλού κόστους εναλλακτική πρόταση.

Μια ακόμα ιδανική περίπτωση αξιοποίησης της τεχνολογίας WiMAX είναι η ανάπτυξη δικτύων επικοινωνίας σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών. Ήδη, σχετική τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε για να βοηθήσει το συντονισμό και τις επικοινωνίες στην Ινδονησία μετά το καταστροφικό τσουνάμι του 2004, όταν όλες οι υπόλοιπες επικοινωνίες (εκτός από τους ασυρμάτους) είχαν καταστραφεί, καθιστώντας αδύνατη την επικοινωνία των επιζώντων με τον υπόλοιπο κόσμο. Σε αυτά τα πλαίσια, η εταιρία επεξεργαστών Ιντέλ βοήθησε στην ανάπτυξη ενός δικτύου WiMAX στην περιοχή της Νέας Ορλεάνης ύστερα από τις καταστροφές που επέφερε προ διετίας ο τυφώνας Κατρίνα.

Η τεχνολογία WiMAX ήδη συναντά ανταγωνισμό με την μορφή των προτύπων CDMA Code division multiple access - Πολλαπλή Πρόσβαση Διαμοιρασμένου Κώδικα και UMTS Universal Mobile Telecommunications System - Παγκόσμιο Κινητό Σύστημα Τηλεπικοινωνιών, που αφορούν στην κινητή τηλεφωνία τρίτης γενιάς. Πολλές χώρες, ανάμεσα στις οποίες και η Ευρωπαϊκή Ένωση, δεν έχουν προχωρήσει στην δέσμευση συχνοτήτων για χρήση από δίκτυα WiMAX, προς όφελος των τεχνολογιών UMTS. Παρόλα αυτά, ήδη έχει προχωρήσει η ανάπτυξη πιλοτικών αλλά και εμπορικών δικτύων WiMAX, ιδιαίτερα ανάμεσα στις αναπτυσσόμενες χώρες αλλά και σε περιοχές χαμηλής κάλυψης από συμβατικά δίκτυα όπως χώρες του πρώτου κόσμου. Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι η πρόθεση του τηλεπικοινωνιακού κολοσσού Sprint Nextel να αναπτύξει ένα πανεθνικό δίκτυο WiMAX στις ΗΠΑ, το οποίο θα παρέχει πρόσβαση σε 100 εκατομμύρια χρήστες μέσα στο 2008.

### 6.3.2 Δίκτυα LMDS - Local Multipoint Distribution System

Το δίκτυο LMDS Local Multipoint Distribution System [16] είναι η ευρυζωνική ασύρματη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση φωνής,

δεδομένων, υπηρεσιών διαδικτύου και τηλεοπτικών υπηρεσιών στην περιοχή των 25 GHz καθώς και σε υψηλότερες συχνότητες ανάλογα με τη χορήγηση αδειών σε κάθε χώρα. Στην Ελλάδα ισχύει η συχνοτική περιοχή των 25 GHz. Ως αποτέλεσμα των χαρακτηριστικών διάδοσης του σήματος σε αυτό το φάσμα συχνότητας, το LMDS χρησιμοποιεί μια κυψελωτή αρχιτεκτονική δομή, αν και οι υπηρεσίες που παρέχονται είναι για σταθερής θέσης τερματικούς χρήστες και όχι κινούμενους. Παρόμοιες δικτυακές αρχιτεκτονικές ισχύουν και για την ασύρματη πρόσβαση στα 3.6 GHz. Οι δύο αυτές ζώνες, 3.6 και 25 GHz, αποτελούν τις αδειοδοτημένες περιοχές συχνοτήτων για τη σταθερή ασύρματη πρόσβαση στην Ελλάδα.

Το LMDS είναι ένα σύστημα απευθείας μικροκυματικής μετάδοσης από μια τοπική κεραία στο σπίτι ή την επιχείρηση εντός της ακτίνας οπτικής επαφής, αποτελώντας έτσι μια λύση στο αποκαλούμενο "πρόβλημα του τελευταίου μιλίου", προσφέροντας οικονομικές υπηρεσίες ευρείας ζώνης στους τελικούς χρήστες. Το LMDS είναι μια εναλλακτική λύση από την εγκατάσταση οπτικής ίνας μέχρι το χρήστη ή την προσαρμογή της καλωδιακής τηλεόρασης για προσφορά ευρυζωνικών υπηρεσιών (η δυνατότητα αυτή δεν υφίσταται σήμερα στην Ελλάδα). Ανάλογα με την εφαρμογή, το LMDS παρέχει ταχύτητα μέχρι 1.5 Gbps προς τον χρήστη (downstream) και 200 Mbps από το χρήστη προς το δίκτυο (upstream), αν και ένας πιο ρεαλιστικός αριθμός είναι τα 38 Mbps downstream. Μερικές υπηρεσίες προσφέρουν συμμετρική υπηρεσία από και προς το χρήστη, ενώ άλλες προσφέρουν μόνο downstream με το upstream να επιτελείται μέσω ενσύρματων συνδέσεων (ασύμμετρη υπηρεσία). Το κόστος του LMDS θεωρείται πολύ χαμηλότερο από αυτό της εγκατάστασης οπτικών ινών ή της αναβάθμισης των συστημάτων καλωδιακής τηλεόρασης. Οι πρώτες εφαρμογές για την εκμετάλλευση του LMDS θεωρούνται οι:

- Μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων για τις επιχειρήσεις
- Διαλογική (interactive) τηλεόραση και ροή πολυμέσων από το Διαδίκτυο
- Υπηρεσία φωνής (συνήθως ως συμπλήρωμα σε άλλες υπηρεσίες)

Επειδή το LMDS απαιτεί έναν ακριβότερο και ενδεχομένως μεγαλύτερο πομποδέκτη από κάποιον που θα μπορούσε με ευκολία να συσκευαστεί σε μια φορητή συσκευή, δεν αντιμετωπίζεται ως αντικαταστάτης ή ως εναλλακτική λύση

των κινητών ασύρματων τεχνολογιών, όπως 3G και GSM. Επιπρόσθετα, το LMDS προσφέρει πολύ υψηλότερο εύρος ζώνης για δεδομένα. Γενικά, το LMDS είναι για σταθερές θέσεις και προσφέρει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Οι τεχνολογίες όπως το GSM είναι για τους κινητούς χρήστες, με χαμηλότερες ταχύτητες, οι οποίες όμως αυξάνονται με τεχνολογίες που καταλήγουν στο 3G.

Ο παρακάτω πίνακας 6.1 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά όλων των παραπάνω δικτύων

Τεχνολογία	Πρότυπο	Χρήση	Ταχύτητα	Ακτίνα κάλυψης	Συχνότητα
Wi-Fi	IEEE 802.11a	WLAN	μέχρι 54Mbps	μέχρι 1Km	5GHz
Wi-Fi	IEEE 802.11b	WLAN	μέχρι 11Mbps	μέχρι 1Km	2,4GHz
Wi-Fi	IEEE 802.11g	WLAN	μέχρι 54Mbps	μέχρι 1Km	2,4GHz
WiMAX	IEEE 802.16d	WMAN	Μέχρι 75Mbps (20MHz BW)	6-9Km	11GHz
WiMAX	IEEE 802.16e	Mobile WMAN	Μέχρι 30Mbps (10MHz BW)	1,5-5Km	2-6GHz
LMDS		WMAN	1,5-2Gbps (38Mbps downstream)	3-5Km	25GHz
WLL @3.6GHz		WMAN & WWAN		10Km	3,6GHz
HiperLAN 1	ETSI HiperLAN 1	WLAN	μέχρι 20Mbps	μέχρι 50m	5GHz
HiperLAN 2	ETSI HiperLAN 2	WLAN	μέχρι 54Mbps	μέχρι 50m	5GHz

Πίνακας 6.1. Συνοπτικά χαρακτηριστικά δικτύων ασύρματης πρόσβασης.

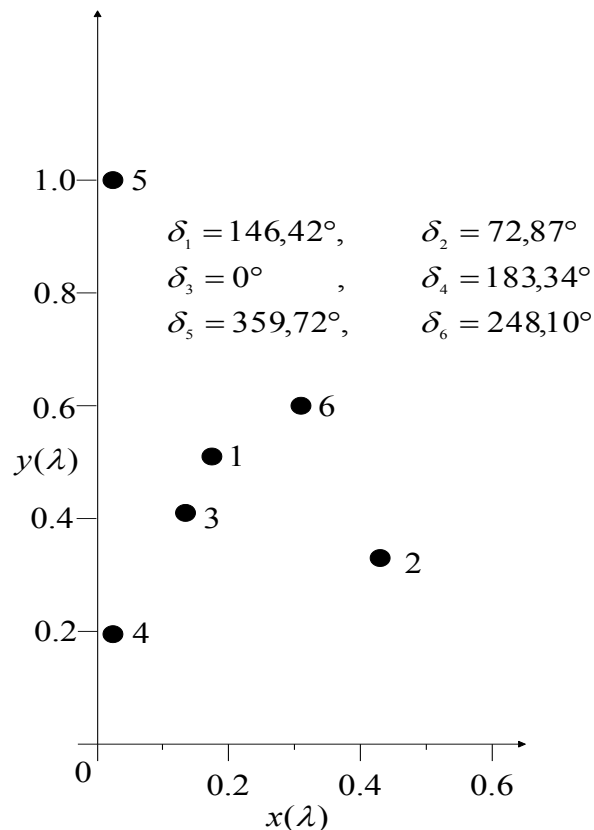
## 6.4 Σύστημα επιλογής δέσμης με 6 ενεργά και παρασιτικά στοιχεία για τις ανάγκες δικτύου Ασύρματης Ευρυζωνικής Πρόσβασης LMDS

### 6.4.1 Στοιχεία σχεδιασμού

Η τεχνολογία ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης έχει αναπτυχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια καθώς η ιδέα της ευρυζωνικότητας προβάλλεται και προωθείται συνεχώς. Η συγκεκριμένη τεχνολογία προσφέρει λύση στην πρόσβαση σε επίπεδο “last-mile”. Λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτατη ανάπτυξη των ευρυζωνικών υπηρεσιών, γίνεται αντιληπτό ότι η ποιότητα των αντίστοιχων ευρυζωνικών δικτύων πρέπει να διατηρηθεί στο μέγιστο δυνατό επίπεδο. Η εγκατάσταση και ενσωμάτωση ευφών κεραιοσυστημάτων σε τέτοια δίκτυα φαίνεται να έχει θετική επίδραση και να ικανοποιούνται οι ανάγκες σε χωρητικότητα και όγκου δεδομένων [18]. Επιπροσθέτως, το πρότυπο IEEE 802.16a για τοπικά και μητροπολιτικά δίκτυα αναφέρει ότι πλήρως προσαρμοστικά συστήματα κεραιών, αποτελούμενα από περισσότερα του ενός στοιχείου, μπορούν να βελτιώσουν την κάλυψη και χωρητικότητα του συστήματος προσαρμόζοντας το διάγραμμα ακτινοβολίας προς τον τερματικό συνδρομητή [19]. Πρόσφατες μελέτες κατέδειξαν ότι η τεχνολογία πολλαπλών κεραιών θα βελτιώσει την επίδοση των ασύρματων ευρυζωνικών δικτύων (Broadband Wireless Access BWA Networks), κάνοντάς τα μάλιστα ανταγωνιστικά με τις τεχνολογίες xDSL (Digital Subscriber Line) και FTTH (Fiber To The Home), οι οποίες λειτουργούν σε μέσα που δεν έχουν μεταβολές και επομένως προσφέρουν καλή ποιότητα υπηρεσιών [20]. Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα επιλογής δέσμης με λιγότερο πολύπλοκη δομή και σχετικά χαμηλότερο κόστος κατασκευής έχουν αντίστοιχες επιδόσεις και μπορούν να προσφέρουν σημαντικά στην μεγιστοποίηση της συνολικής προσφερόμενης χωρητικότητας του δικτύου. Βελτιωμένος σηματοθορυβικός λόγος, μείωση στη διασπορά της χρονοκαθυστερήσης (delay spread) και των αποσβέσεων λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης, αυξημένος λόγος σήματος προς παρεμβολές (Carrier-to-Interference ratio C/I), και τελικά βελτιωμένος λόγος λαθών (BER) είναι κάποια από τα πλεονεκτήματα που έχουν αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Το κεραιοσύστημα που περιγράφεται στη συγκεκριμένη παράγραφο, αναλύθηκε με τη μέθοδο EMF (Electro-Motive Force) ενώ στο σχεδιασμό και βελτιστοποίησή του χρησιμοποιήθηκε γενετικός αλγόριθμος. Στόχος του σχεδιασμού

είναι η κάλυψη μιας κυψέλης ευρυζωνικού σταθμού βάσης, εύρους  $60^\circ$  με τρεις διαφορετικές κατευθυντικές δέσμες κάθε μια από τις οποίες με κέρδος 18 dBi. Αυτές οι τρεις δέσμες επί της ουσίας δημιουργούν τρεις υποκυψέλες και θα χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων προς τον τερματικό χρήστη. Μια τέταρτη δέσμη με κάλυψη σε όλη την κυψέλη και κέρδος ίσο με 15 dBi θα χρησιμοποιείται για τη μετάδοση της σηματοδότησης.



Σχήμα 6.2 Χωροθέτηση των 6 στοιχείων και σχετικές φάσεις τροφοδότησης

Η ανάγκη για υψηλή τιμή κέρδους μεγαλύτερη των 15dBi, με τη χρησιμοποίηση κεραιοσυστήματος ενεργών και παρασιτικών στοιχείων μικρού σχετικά πλήθους, οδήγησε στην ενσωμάτωση δύο τέλειων αγωγίμων επιφανειών οι οποίες και είχαν το ρόλο ανακλαστήρων. Τα στοιχεία της κεραίας είναι κάθετα πολωμένα, το σημείο τροφοδότησης είναι στο κέντρο των διπόλων, είναι τοποθετημένα παράλληλα με τον z άξονα, βρίσκονται στο πρώτο τεταρτημόριο του επιπέδου x-y και οι δύο ανακλαστικές επιφάνειες είναι στα επίπεδα x – z και y – z. Μια κεραία N ενεργών/παρασιτικών διπόλων με γωνιακό ανακλαστήρα, μπορεί να

αντικατασταθεί με μια κεραία 4\*N ενεργών/παρασιτικών διπόλων σύμφωνα με τη θεωρία ειδώλων.

Από το σχεδιασμό προέκυψε μια κεραία 6 στοιχείων (μήκος διπόλου  $l=\lambda/2$ , ακτίνα  $a=0.001\lambda$ ,  $\lambda$  το μήκος κύματος), η διάταξη της οποίας φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 6.2. Για το γενετικό αλγόριθμο θεωρήθηκαν 100 γενιές με 30 χρωμοσώματα. Κάθε λύση του αλγόριθμου περιελάμβανε τις συντεταγμένες των στοιχείων και τη διαφορά φάσης τροφοδότησης  $\delta m$ . Οι παράμετροι του γενετικού ήταν κανονικοποιημένη γεωμετρική ταξινόμηση ως μηχανισμός επιλογής, ως μηχανισμός διασταύρωσης επιλέχθηκε ένας υβριδικός συνδυασμός αριθμητικής, ευρετικής και απλής διασταύρωσης ενώ ως μηχανισμός απόρριψης θεωρήθηκε ένας υβριδικός συνδυασμός οριακής, ομοιόμορφης, ανομοιόμορφης και πολυανομοιόμορφης απόρριψης. Η αντικειμενική συνάρτηση ακολούθησε τη λογική του σχεδιασμού που παρατέθηκε σε προηγούμενη παράγραφο και είναι η εξής

$$fit = \frac{8}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{f_{i,max}} + \sum_{i=1}^3 10^{\frac{|18-G_i|}{10}} + 10^{\frac{|15-G_4|}{10}}} \quad (6.1)$$

όπου  $f_{i,max}$  ο μέγιστος συντελεστής καταλληλότητας για κάθε ένα επιθυμητό διάγραμμα ακτινοβολίας και  $G_i$  ( $i=1,\dots,4$ ) το κέρδος σε dB*i*. Η επιλογή τιμής για το συντελεστή  $f_{i,max}$  ρυθμίστηκε να γίνεται από τις  $2N-1$  (πλήθος ψηφιακών κωδικολέξεων) διαθέσιμες  $f_i$  τιμές. Κάθε μια  $f_i$  τιμή ήταν σε συνάρτηση με το σχετικό λάθος μεταξύ του επιθυμητού και του υπολογιζόμενου διαγράμματος ακτινοβολίας. Το υπολογιζόμενο διάγραμμα προέκυπε όταν γινόταν εισαγωγή της ψηφιακής κωδικολέξης στο σύστημα τροφοδότησης του κεραιοσυστήματος. Το σχετικό λάθος μεταξύ των επιθυμητών-υπολογιζόμενων διαγραμμάτων καθοριζόταν με βήμα  $1^\circ$  για τον κύριο λοβό και με βήμα  $2^\circ$  για τους δευτερεύοντες λοβούς. Τέλος στην αντικειμενική συνάρτηση γινόταν κανονικοποίηση μεταξύ των τιμών 0 και 1.

Ο ακόλουθος πίνακας 6.2 περιλαμβάνει αναλυτικά τις θέσεις των στοιχείων στο x-y επίπεδο.

Element	$x_m$ (λ)	$y_m$ (λ)
1	0.155	0.552
2	0.410	0.266
3	0.131	0.402
4	0.010	0.178
5	0.010	1.000
6	0.333	0.653

Πίνακας 6.2 Συντεταγμένες στοιχείων

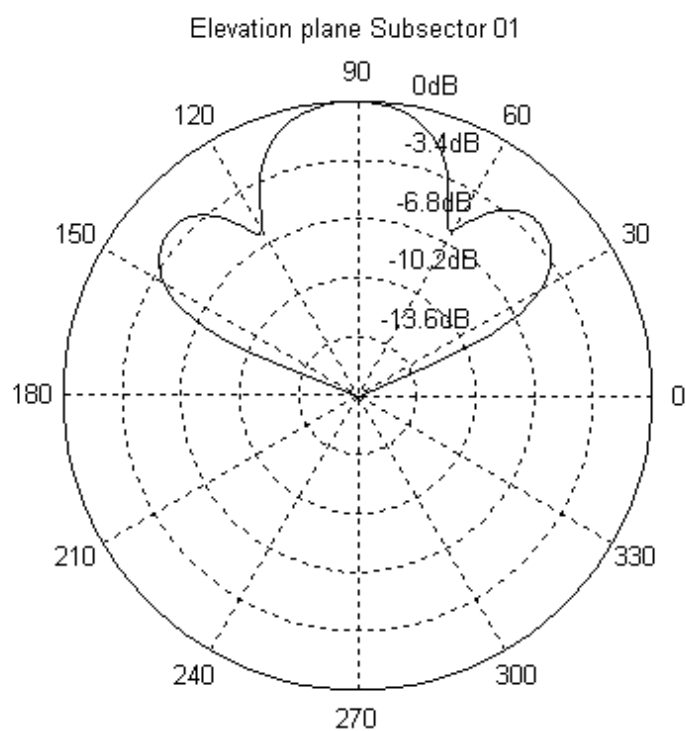
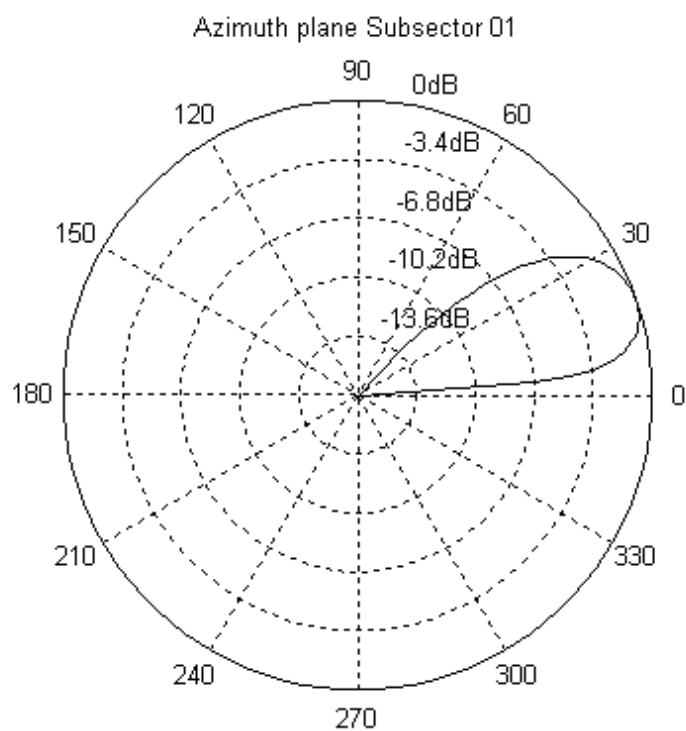
Τα θεωρητικά κανονικοποιημένα διαγράμματα ακτινοβολίας με τη μέθοδο EMF φαίνονται στα σχήματα 6.3-6.6. Τα ακόλουθα σχήματα 6.7-6.10 παρουσιάζουν τα διαγράμματα ακτινοβολίας θεωρώντας πεπερασμένες ανακλαστικές επιφάνειες διαστάσεων 12λ×12λ και για συχνότητα  $f=3.5$  GHz. Να σημειωθεί ότι η περαιτέρω μελέτη βασίστηκε στα τελευταία διαγράμματα. Τέλος στο σχήμα 6.11 παρουσιάζονται όλα τα οριζόντια διαγράμματα συγκριτικά.

#### 6.4.2 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης

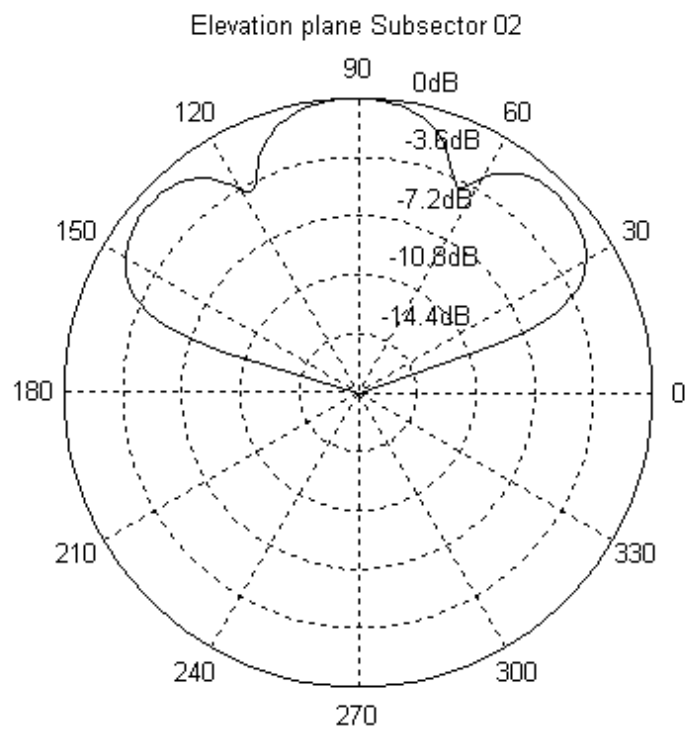
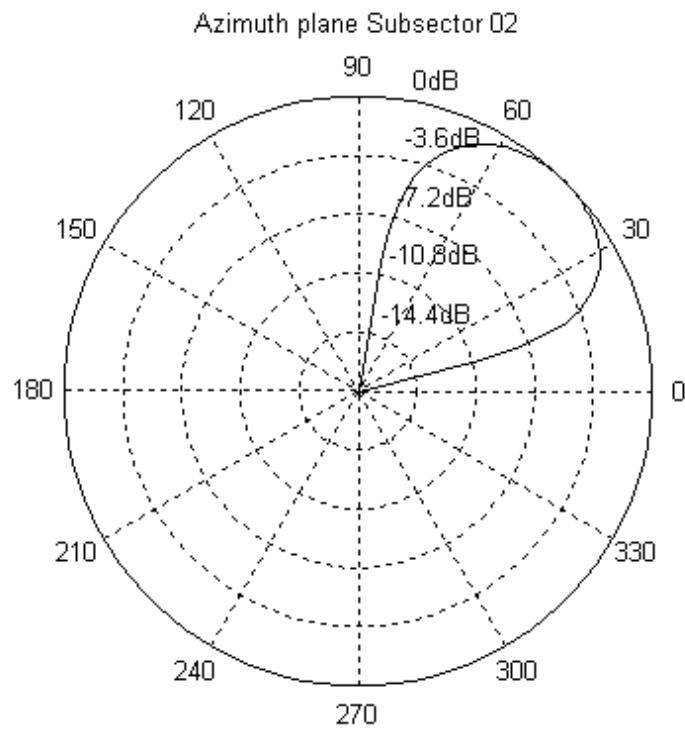
Επτά μητροπολιτικοί ευρυζωνικοί σταθμοί βάσης επιλέχθηκαν για την προσομοίωση. Οι σταθμοί τοποθετήθηκαν σε κεντρικά σημεία της πόλης και κατά μήκος μεγάλων οδικών αξόνων. Μία κυψέλη από κάθε σταθμό επιλέχθηκε για να αξιολογηθεί η διαφορά κάλυψης που προσφέρει μια συμβατική κεραία με κέρδος 15 dBi και το προτεινόμενο κεραιοσύστημα με τα ενεργά και παθητικά στοιχεία. Οι παράμετροι της προσομοίωσης ήταν οι ακόλουθοι:

- Ύψος εγκατάστασης του κεραιοσυστήματος στο σταθμό βάσης: 45m-150m (από την επιφάνεια της θάλασσας)
- Μηχανικό downtilt: 2°
- Ισχύς εκπομπής: 17dBm
- Σχήμα διαμόρφωσης: 4-QAM
- Κεραιοσύστημα τερματικού σταθμού: παραβολικά κεραία κέρδους 18dBi
- Ύψος εγκατάστασης του κεραιοσυστήματος στον τερματικό σταθμό: 3m (από την απόληξη του κτιρίου)
- Κάθετη πόλωση
- Ακτίνα κάλυψης 2Km-5Km
- Συχνότητα: 3,5GHz

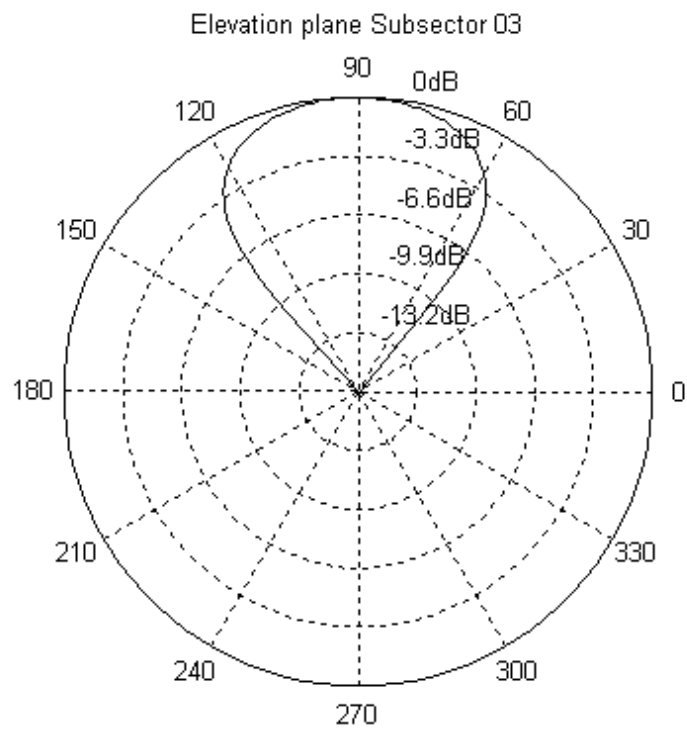
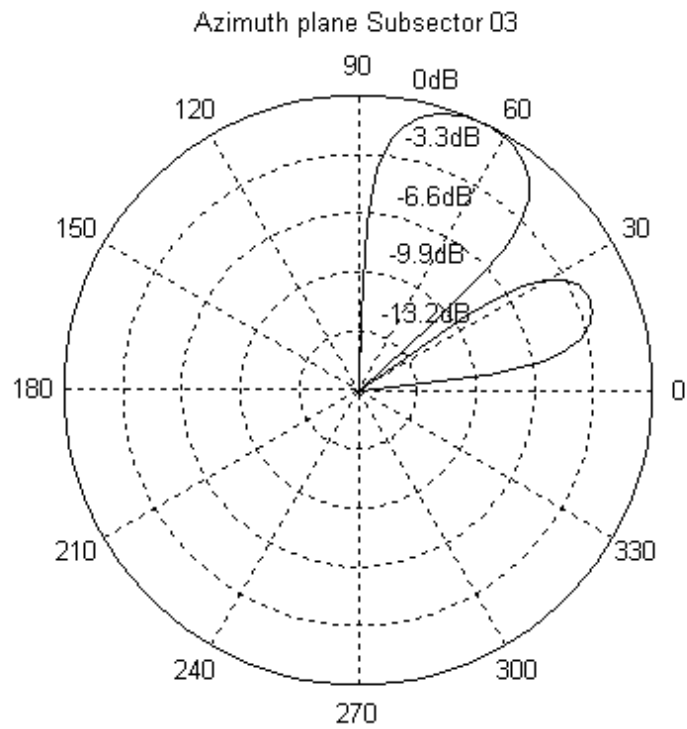




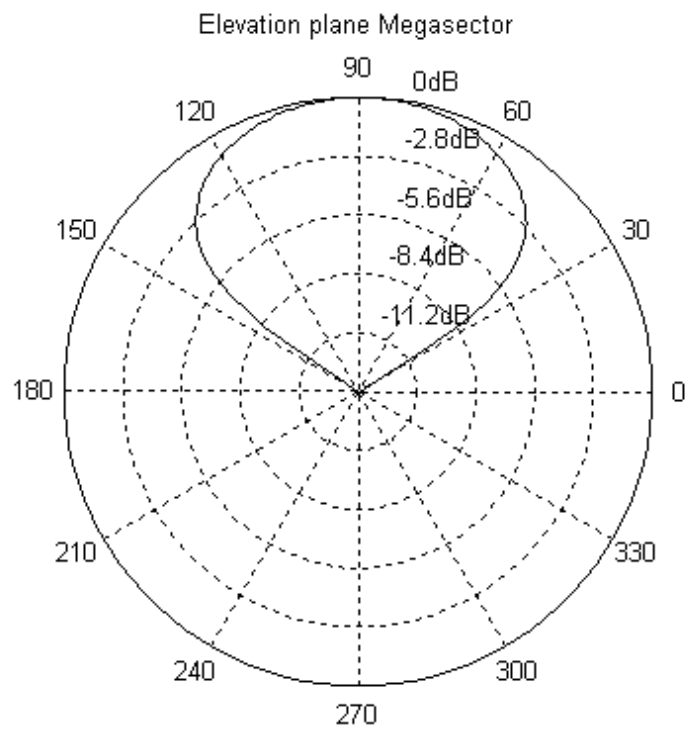
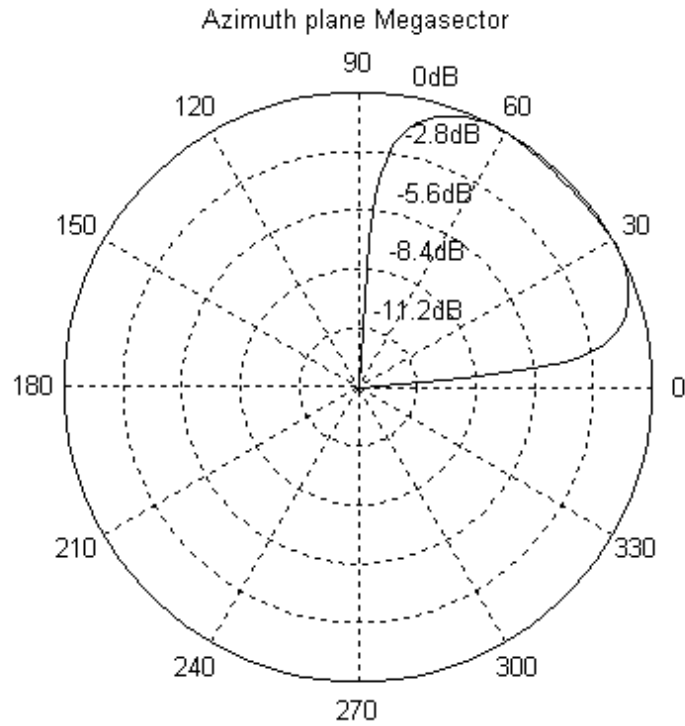
Σχήμα 6.3 Θεωρητικό διάγραμμα ακτινοβολίας υποκυψέλης 1



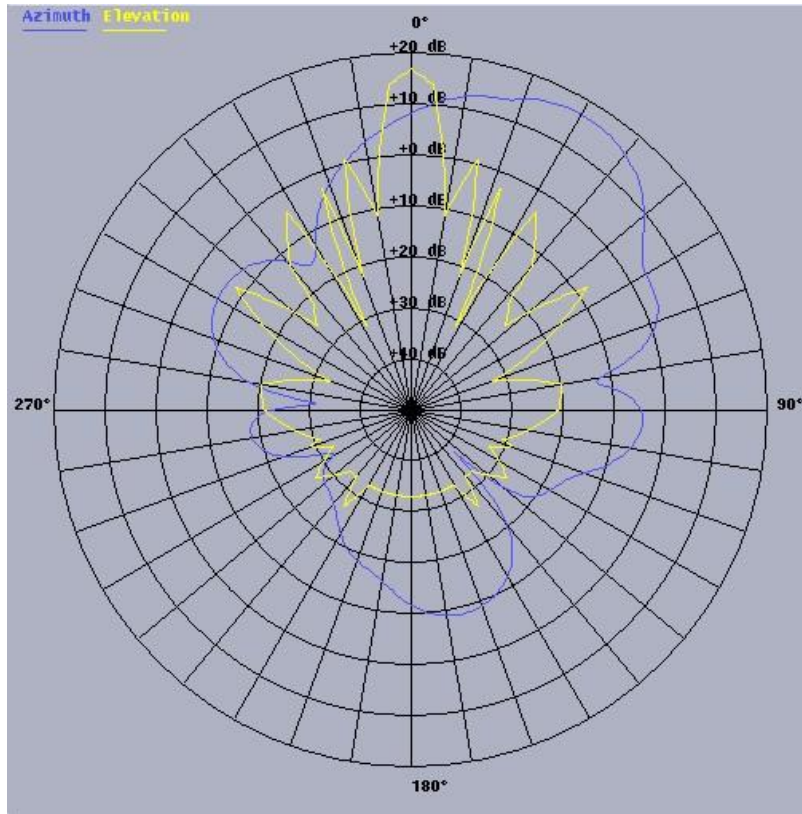
Σχήμα 6.4 Θεωρητικό διάγραμμα ακτινοβολίας υποκουψέλης 2



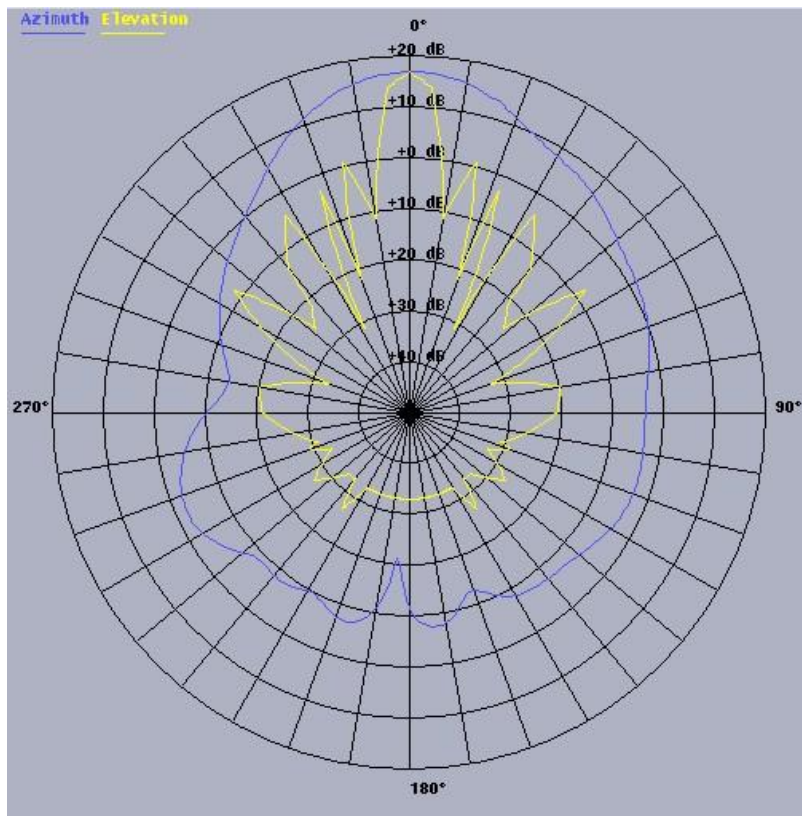
Σχήμα 6.5 Θεωρητικό διάγραμμα ακτινοβολίας υποκυψέλης 3



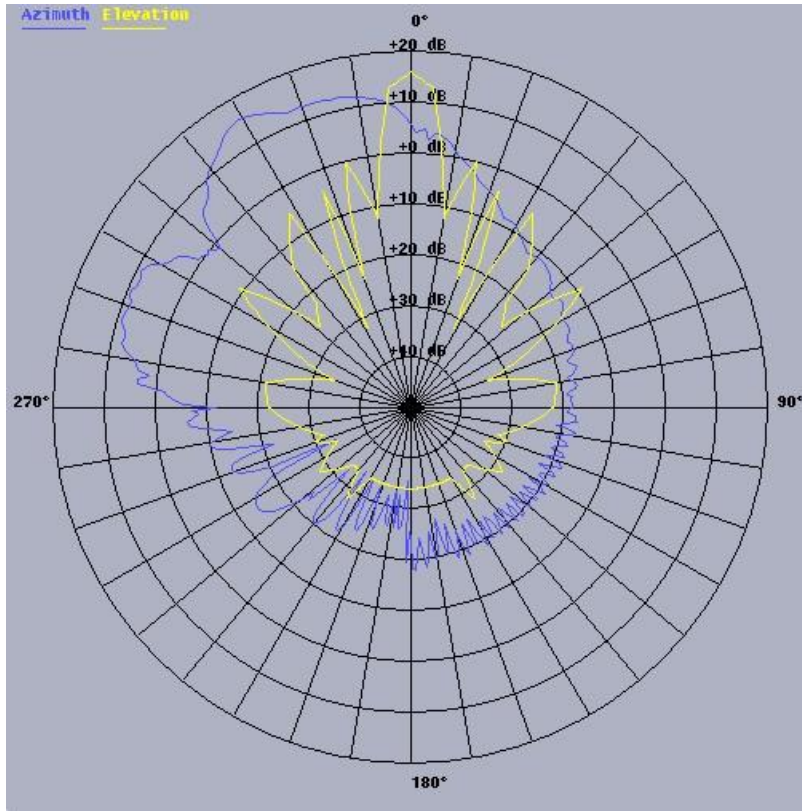
Σχήμα 6.6 Θεωρητικό διάγραμμα ακτινοβολίας κυψέλης σηματοδοσίας



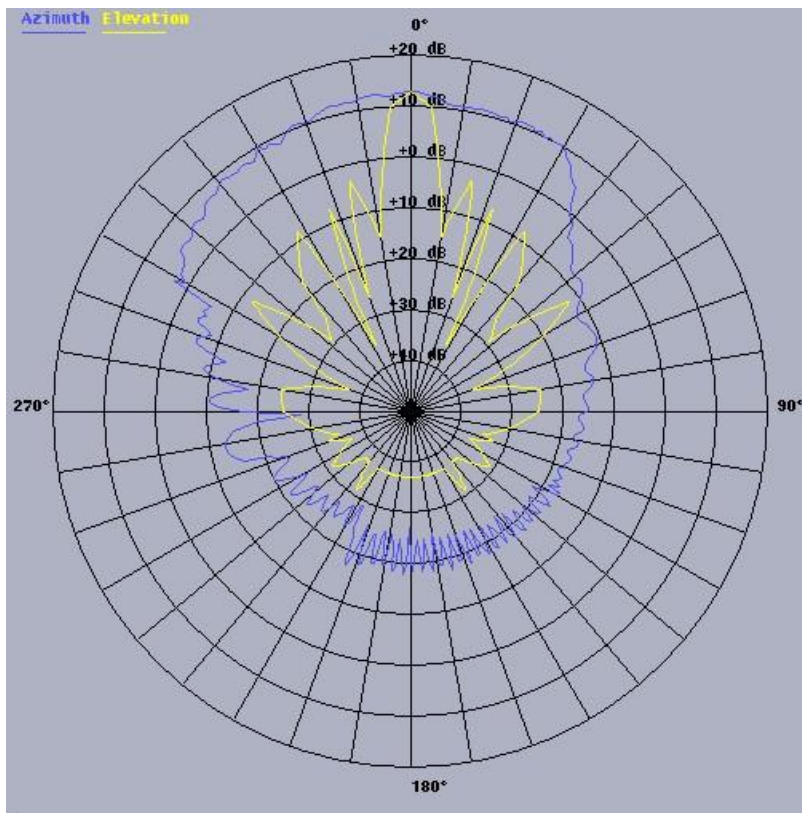
Σχήμα 6.7 Διάγραμμα ακτινοβολίας υποκυψέλης 1



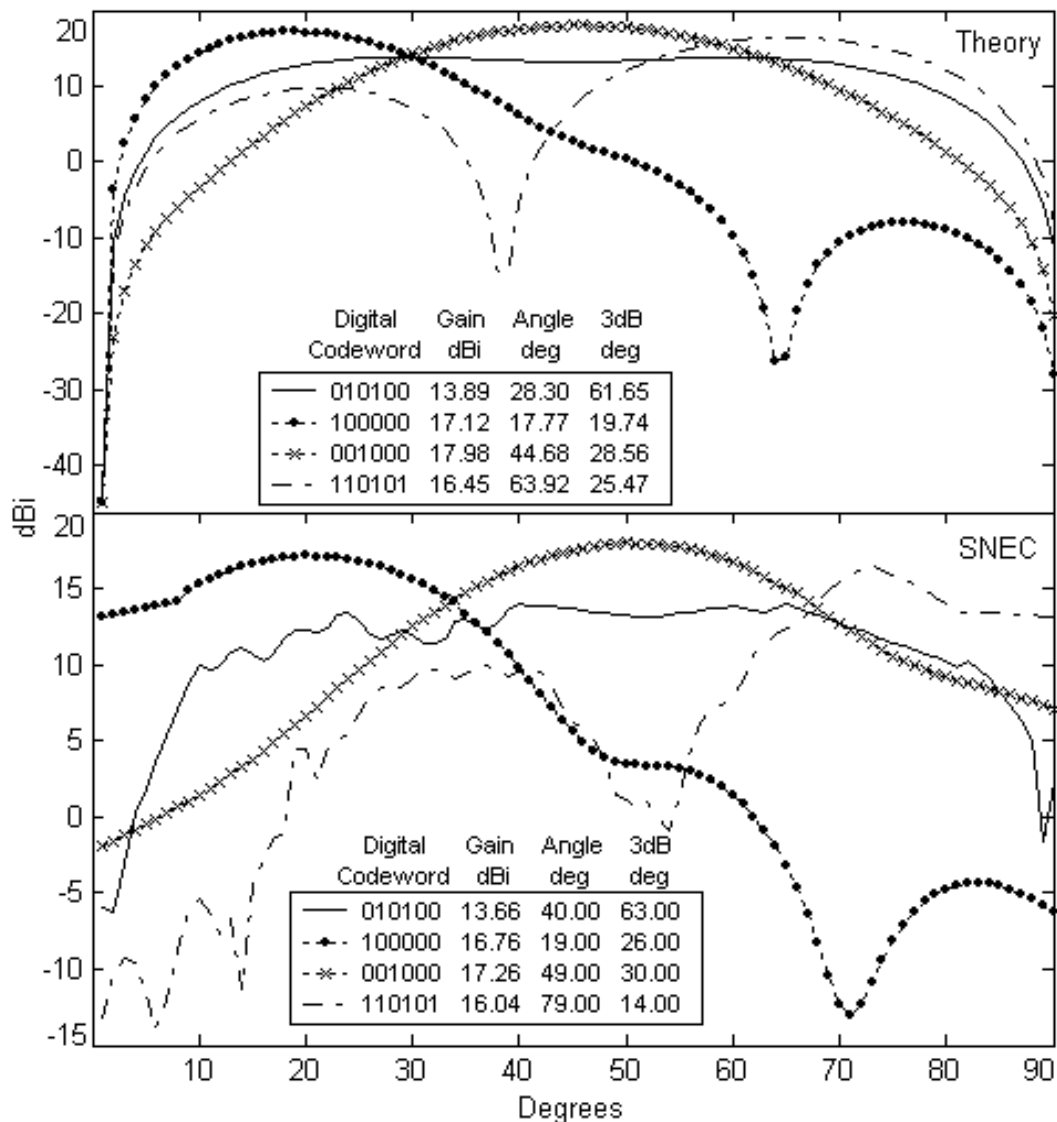
Σχήμα 6.8 Διάγραμμα ακτινοβολίας υποκυψέλης 2



Σχήμα 6.9 Διάγραμμα ακτινοβολίας υποκυψέλης 3



Σχήμα 6.10 Διάγραμμα ακτινοβολίας κυψέλης σηματοδοσίας



Σχήμα 6.11 Διαγράμματα ακτινοβολίας (συγκριτικά)

Να σημειωθεί ότι για την ανάλυση της κάλυψης χρησιμοποιήθηκε ψηφιακός χάρτης που περιελάμβανε τις κτηριακές υποδομές. Το λογισμικό πακέτο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το iQ-Link της εταιρείας Comsearch. Το συγκεκριμένο εργαλείο ειδικεύεται στη θεωρητική μελέτη μικροκυματικών ζεύξεων point-to-point και στον υπολογισμό κάλυψης συστημάτων point-to-multipoint τόσο σε συνθήκες διάδοσης οπτικής επαφής (line-of-sight) όσο και σε συνθήκες διάδοσης χωρίς οπτική επαφή (non-light-of-sight). Για την ανάλυση της ραδιοκάλυψης σταθμών βάσης, η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι η εξής: η περιοχή ενδιαφέροντος γύρω από το σταθμό χωρίζεται σε υποπεριοχές και δημιουργείται έτσι ένα επιφανειακό πλέγμα.. Στην παρούσα μελέτη, η ελάχιστη επιφάνεια ορίστηκε στα  $100\text{m}^2$ . Σε κάθε ένα τέτοιο

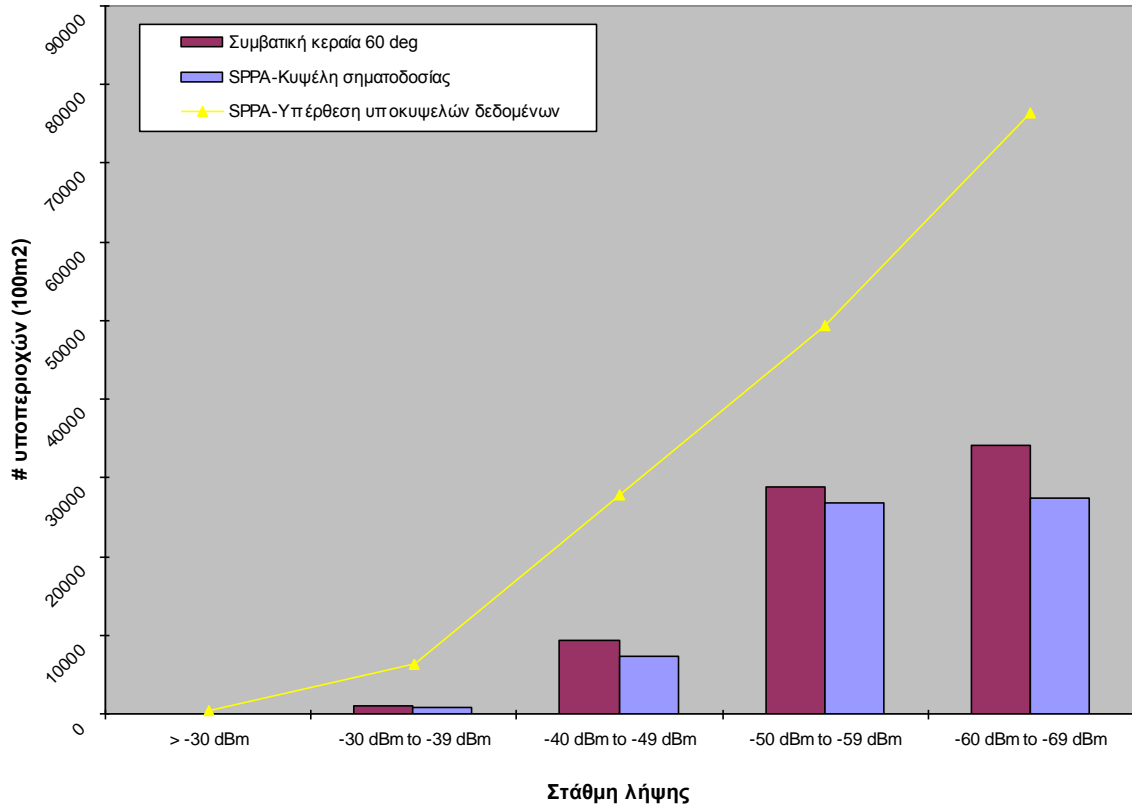
τμήμα υπολογίζεται στη συνέχεια η στάθμη λήψης του σήματος από το σταθμό βάσης. Να σημειωθεί ότι ο καθορισμός μικρότερης ελάχιστης επιφάνειας ναι μεν θα έδινε πιο ακριβή αποτελέσματα, αλλά ο χρόνος υπολογισμού θα ήταν πολύ μεγαλύτερος.

Για κάθε μια από τις επιλεγμένες κυψέλες, τρεις καλύψεις υπολογίστηκαν. Η πρώτη θεωρώντας τη συμβατική κεραία εύρους 60°, η δεύτερη θεωρώντας το προτεινόμενο κεραιοσύστημα με τη ρύθμιση για κάλυψη μετάδοσης σηματοδοσίας (60° άνοιγμα 3dB - κωδικολέξη: '010100') και η τρίτη θεωρώντας την υπέρθεση των τριών διαγραμμάτων ακτινοβολίας για κάλυψη κατά την εκπομπή δεδομένων.

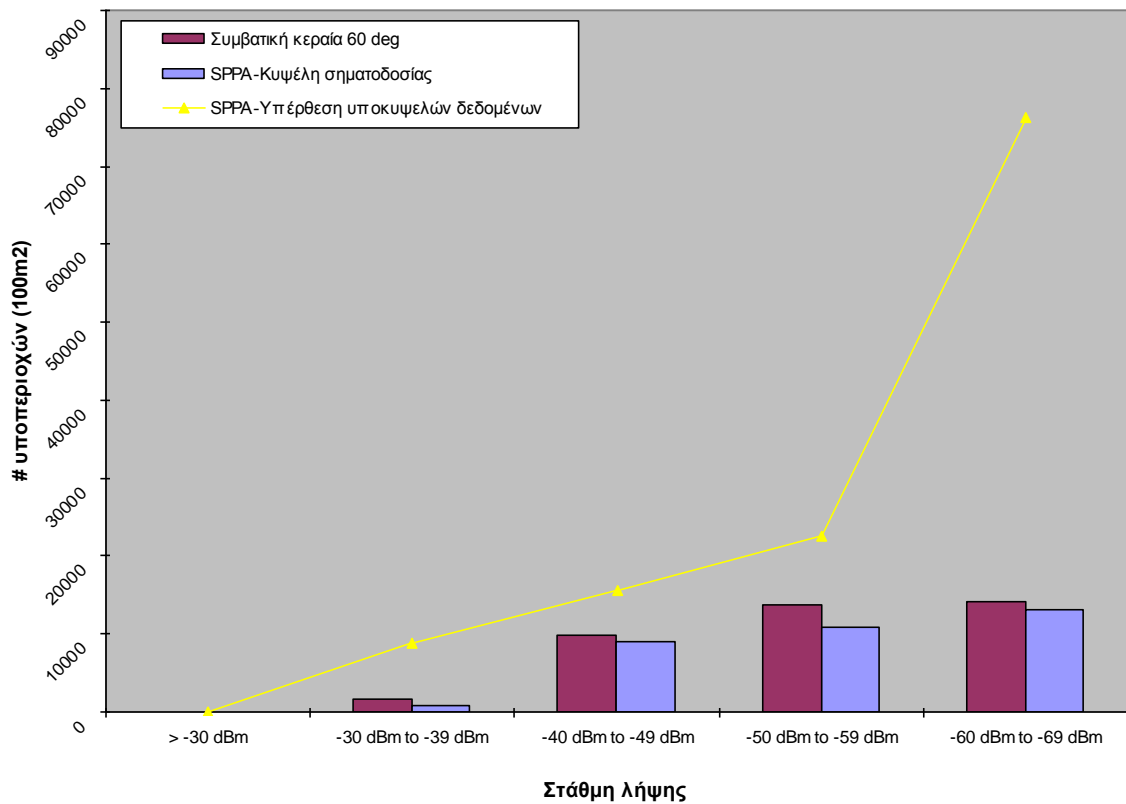
#### 6.4.2.1 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης για το σενάριο κτηρίου σε αστικό κέντρο

Τα παρακάτω σχήματα 6.12α-6.12δ παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για το σενάριο του σταθμού βάσης σε ψηλό κτήριο αστικού κέντρου. Να σημειωθεί ότι στο συγκεκριμένο σταθμό θεωρήθηκαν τέσσερις κυψέλες με διαφορά στον μεταξύ τους προσανατολισμό ίση με 90° (Sector 1-43°, Sector 2-133°, Sector 3-223°, Sector 4-2-313°). Είναι φανερό ότι οι καλύψεις που προσφέρονται από μια συμβατική κεραία ανοίγματος 60° (μωβ μπάρες) και της κεραίας που έχει σχεδιαστεί με ρύθμιση για το διάγραμμα σηματοδοσίας (γαλάζιες μπάρες) είναι ισοδύναμες και άμεσα συγκρίσιμες. Σε μια πιθανή αντικατάσταση λοιπόν, η προσφερόμενη κάλυψη είναι συγκρίσιμη και σε μικρό βαθμό ασθενέστερη. Το σημαντικό στοιχείο που προκύπτει είναι ότι με την ενεργοποίηση των υποκυψελών, η προσφερόμενη κάλυψη (κίτρινη γραμμή) είναι αισθητά ενισχυμένη. Το σχήμα 6.13 παρουσιάζει συνολικά τα αποτελέσματα για το συγκεκριμένο σενάριο.

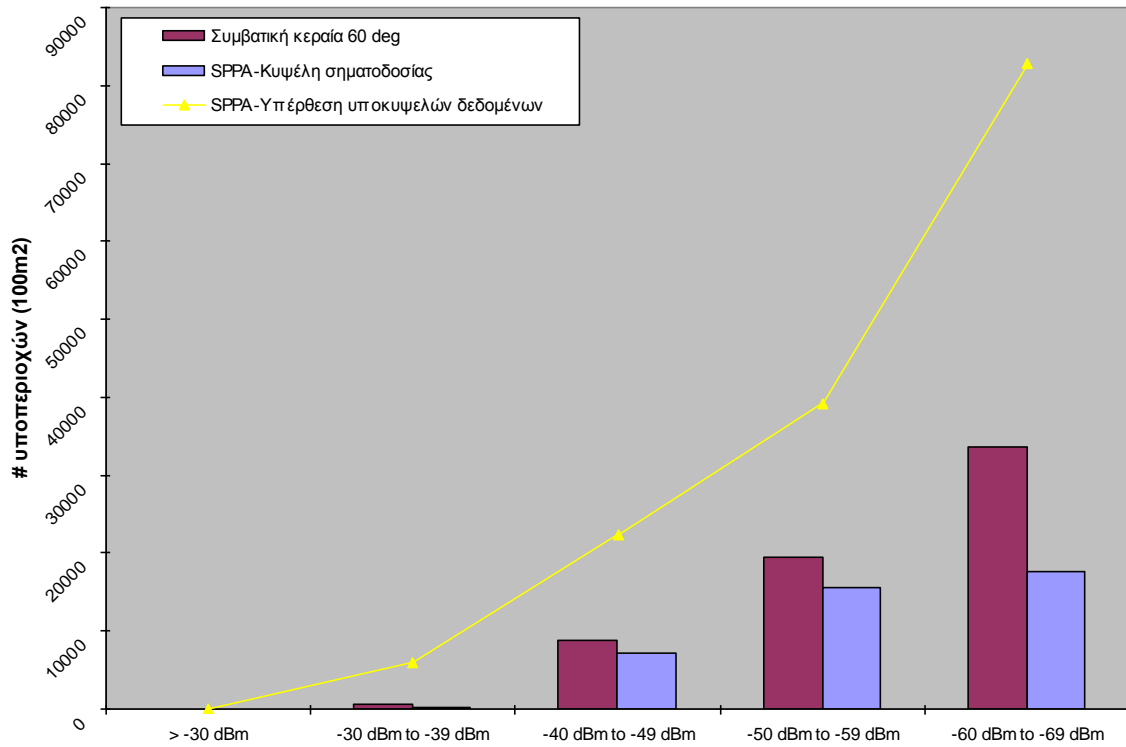




Σχήμα 6.12α Αποτελέσματα για ΣΒ σε ψηλό κτήριο για sector με κατεύθυνση 43°

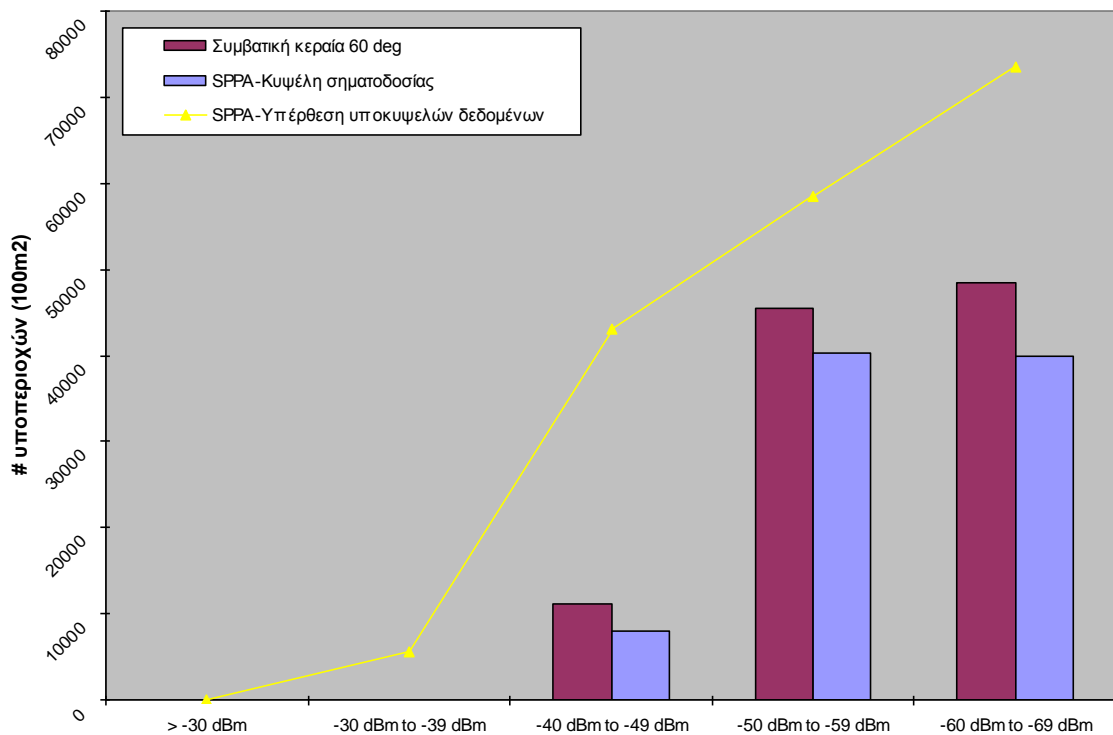


Σχήμα 6.12β Αποτελέσματα για ΣΒ σε ψηλό κτήριο για sector με κατεύθυνση 133°



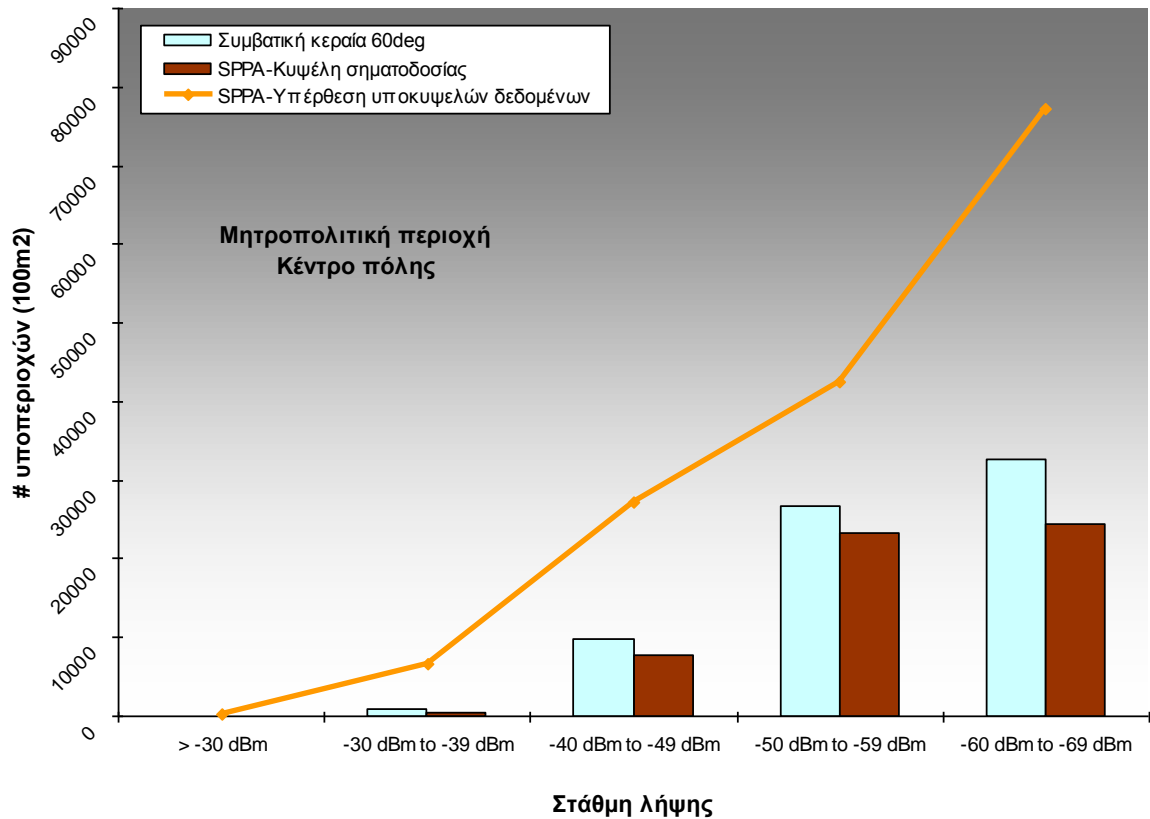
Στάθμη λήψης

Σχήμα 6.12γ Αποτελέσματα για ΣΒ σε ψηλό κτήριο για sector με κατεύθυνση 223°



Στάθμη λήψης

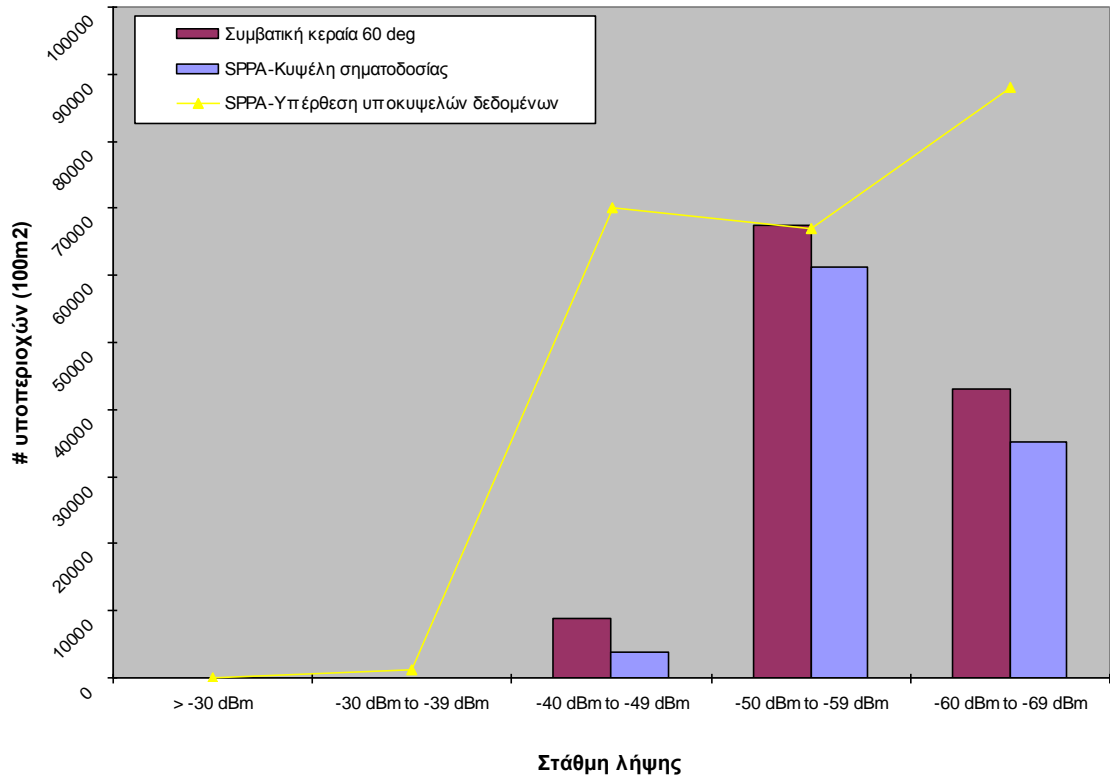
Σχήμα 6.12δ Αποτελέσματα για ΣΒ σε ψηλό κτήριο για sector με κατεύθυνση 313°



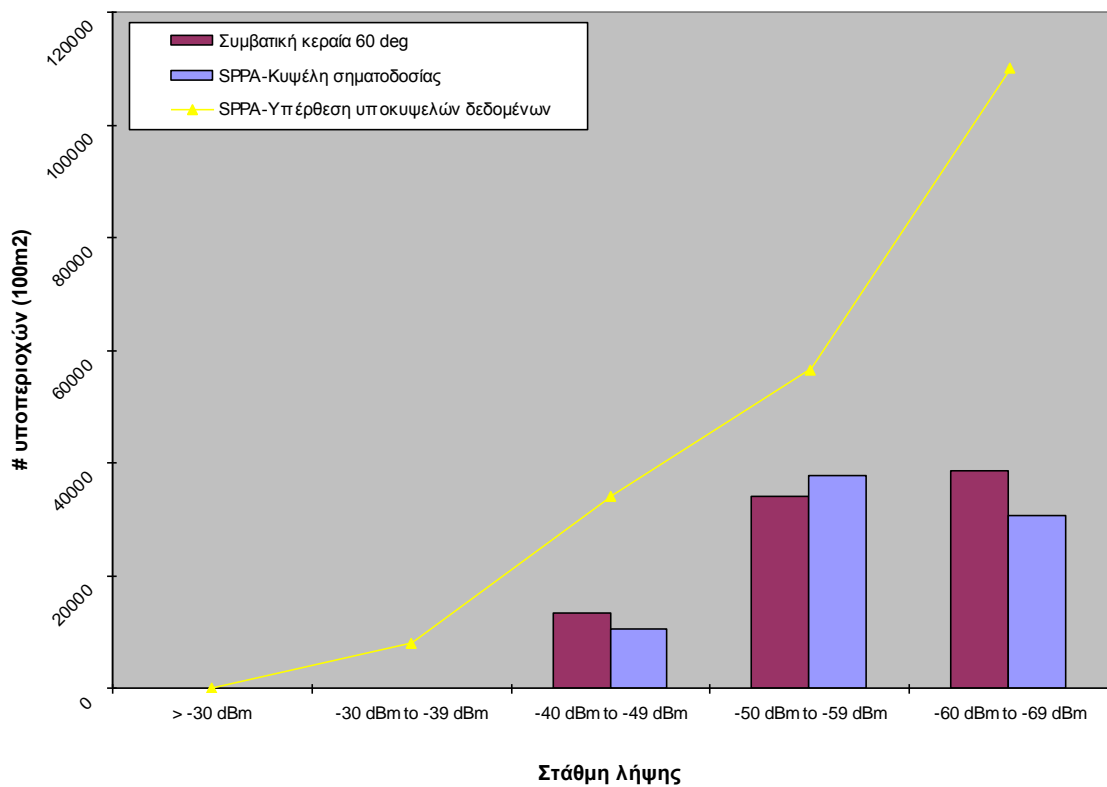
Σχήμα 6.13 Συνολικά αποτελέσματα για ΣΒ σε ψηλό κτήριο

#### 6.4.2.2 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης για το σενάριο σταθμού σε ύψωμα

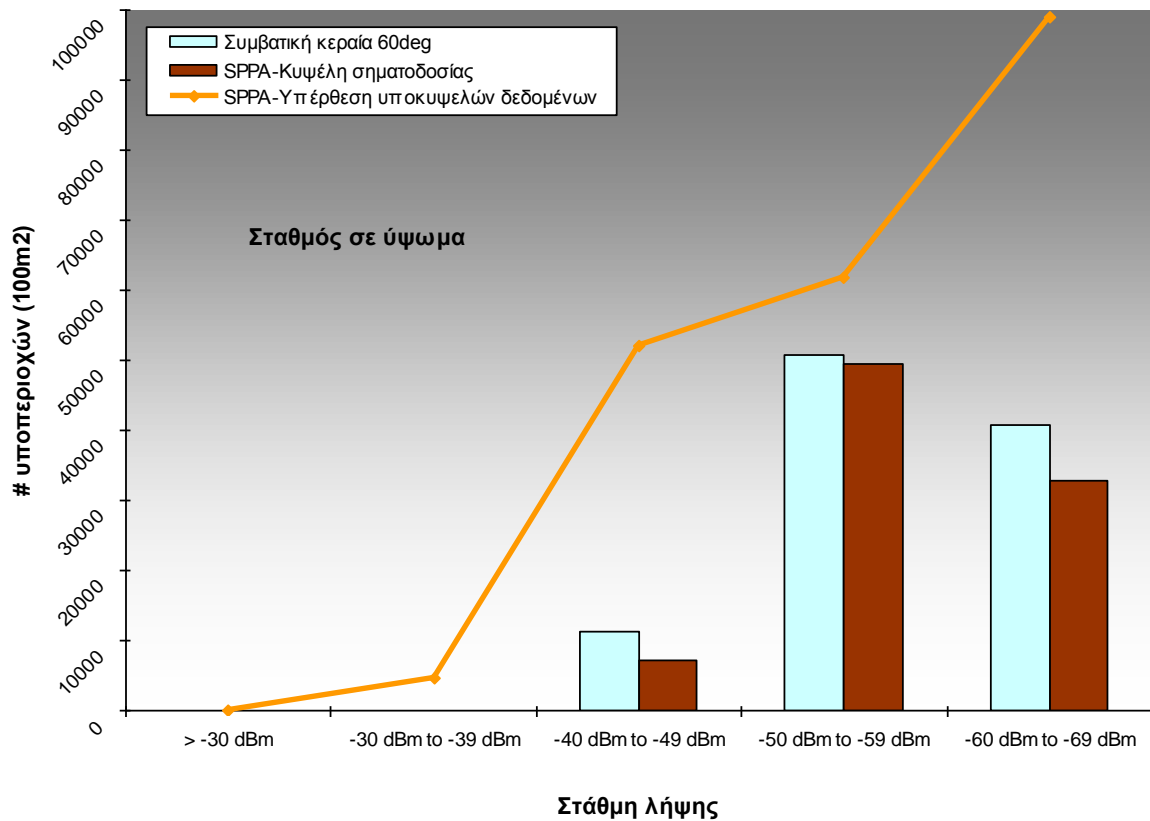
Τα παρακάτω σχήματα 6.14α-6.14β παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για το σενάριο του σταθμού βάσης σε λοφώδες ύψωμα που καλύπτει αστικό κέντρο. Ο συγκεκριμένος σταθμός θεωρήθηκε ότι καλύπτει το αστικό κέντρο με δύο μόνο κυψέλες. Τα αποτελέσματα είναι αντίστοιχα με το προηγούμενο σενάριο και στο σχήμα 6.15 φαίνονται τα αποτελέσματα συνολικά και για τους δύο τομείς.



Σχήμα 6.14α Αποτελέσματα για ΣΒ σε ύψωμα με κατεύθυνση 86°



Σχήμα 6.14β Αποτελέσματα για ΣΒ σε ύψωμα με κατεύθυνση 176°



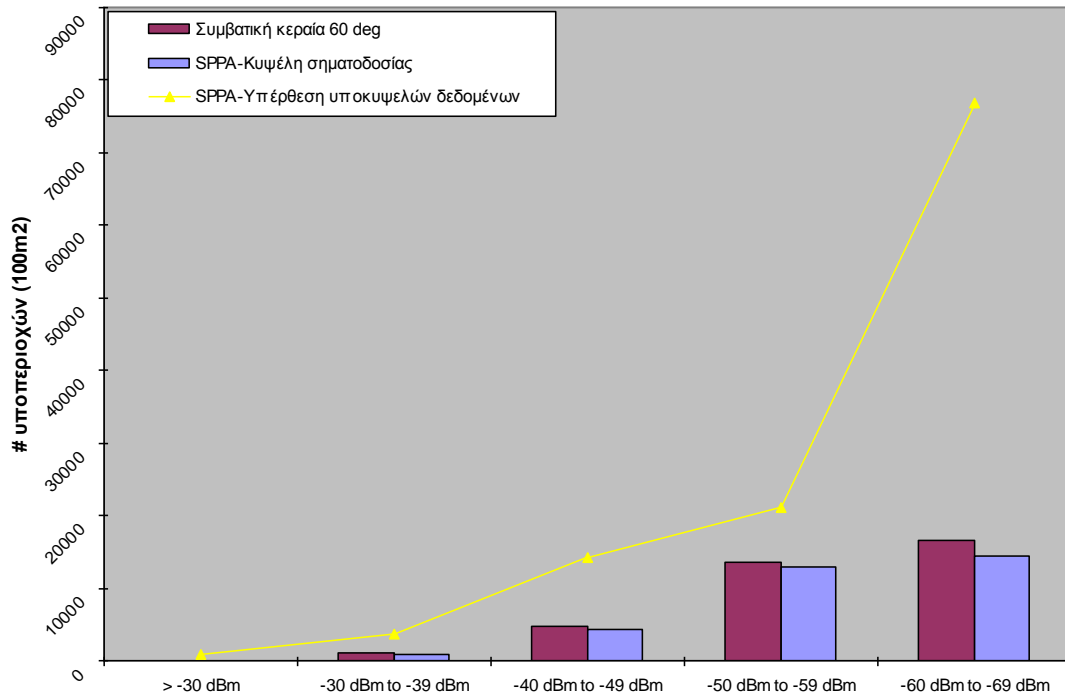
Σχήμα 6.15 Συνολικά αποτελέσματα για ΣΒ σε ύψωμα

#### 6.4.2.3 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης για το σενάριο σταθμού που καλύπτει κεντρικό δρόμο

Τα παρακάτω σχήματα 6.16α-6.16β παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για το σενάριο του σταθμού βάσης σε κτήριο που καλύπτει κεντρικό δρόμο. Ο συγκεκριμένος σταθμός θεωρήθηκε ότι έχει δύο τομείς αντιδιαμετρικά με κατευθύνσεις  $38^\circ$  και  $218^\circ$ . Τα αποτελέσματα συμβαδίζουν με τα αποτελέσματα των υπολοίπων δύο σεναρίων. Τέλος το σχήμα 6.17 παρουσιάζει τα συνολικά αποτελέσματα και για τους δύο τομείς.

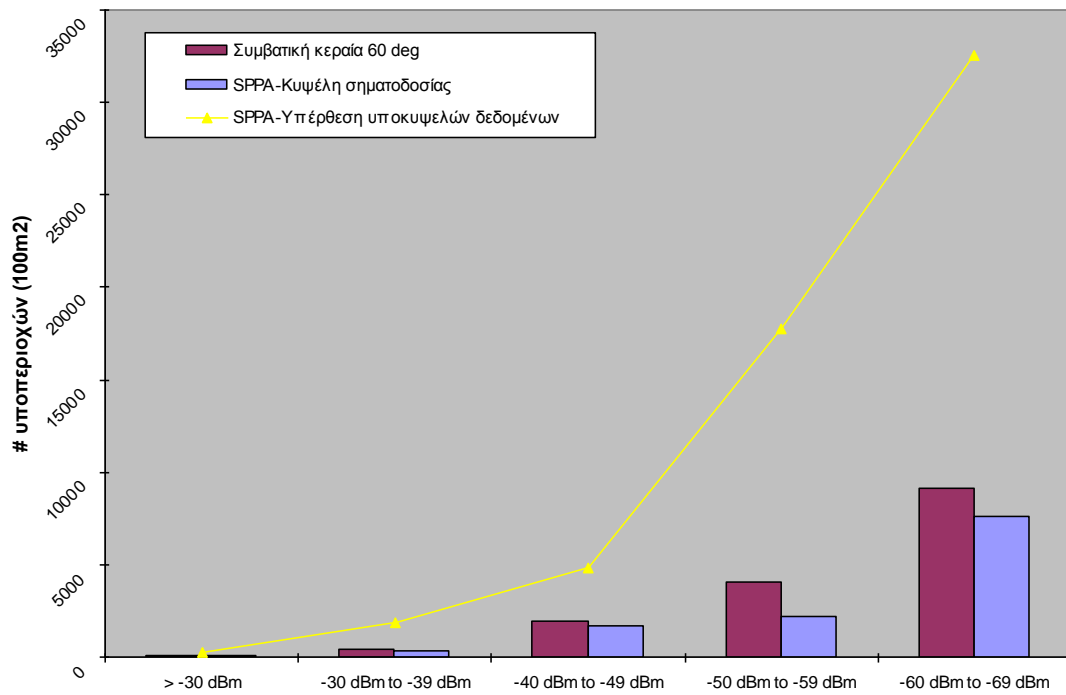
Λαμβάνοντας υπόψη και τα τρία σενάρια, στο σχήμα 6.18 φαίνονται τα τελικά συγκεντρωτικά αποτελέσματα. Για κάθε μια από τις υποπεριοχές έχει υπολογιστεί η διαφορά στη στάθμη λήψης όταν θεωρείται το συμβατικό και το υπό αξιολόγηση κεραιόσυστημα. Να σημειωθεί ότι θετική διαφορά σημαίνει ότι η προτεινόμενη κεραία προσφέρει καλύτερη κάλυψη από τη συμβατική ενώ αρνητική διαφορά το αντίθετο. Οι γκρι μπάρες δηλώνουν την κατανομή της μέσης τιμής της διαφοράς στη στάθμη λήψης του προτεινόμενου κεραιοσυστήματος με ρύθμιση κάλυψης

μετάδοσης σηματοδοσίας RPLSPA60 και του συμβατικού κεραιοσυστήματος RPLCONV. Η διαφορά αυτή ορίζεται ως RPLSPA60 – RPLCONV.



Στάθμη λήψης

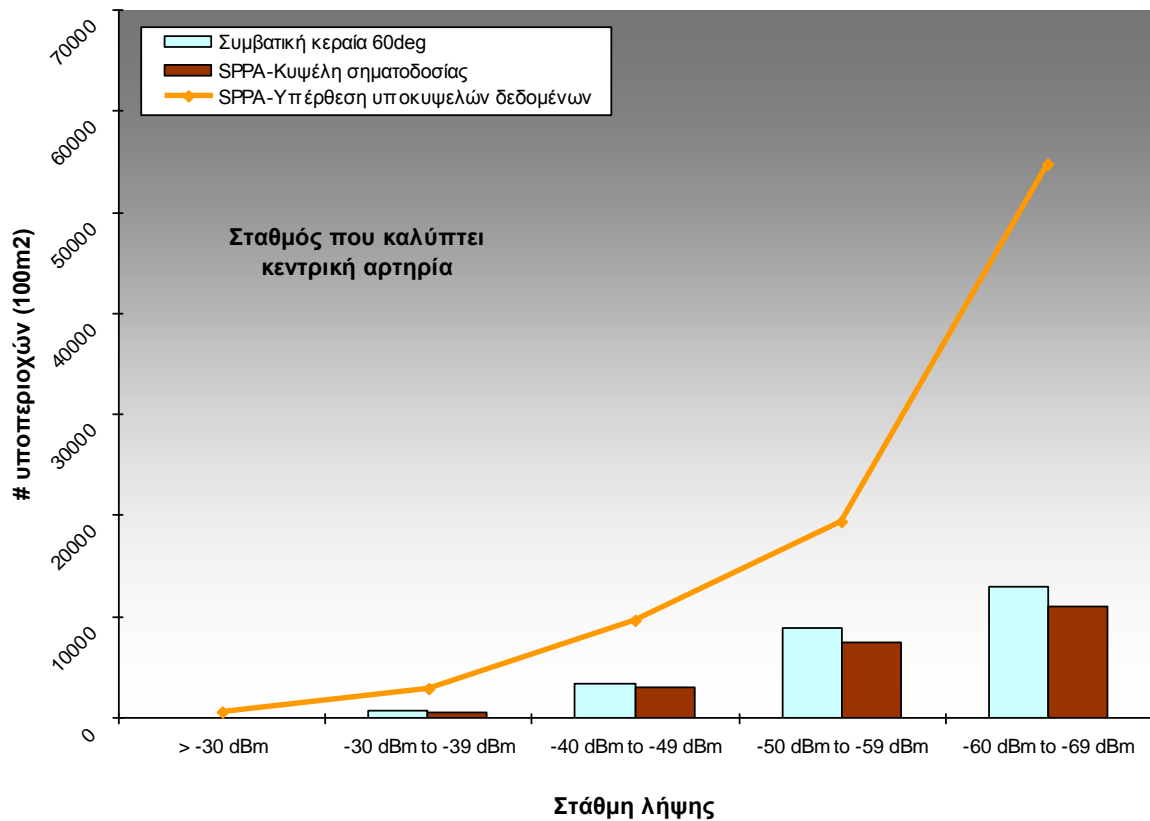
Σχήμα 6.16α Αποτελέσματα για ΣΒ που καλύπτει κεντρικό δρόμο με κατεύθυνση 38°



Στάθμη λήψης

Σχήμα 6.16β Αποτελέσματα για ΣΒ που καλύπτει κεντρικό δρόμο με κατεύθυνση

218°



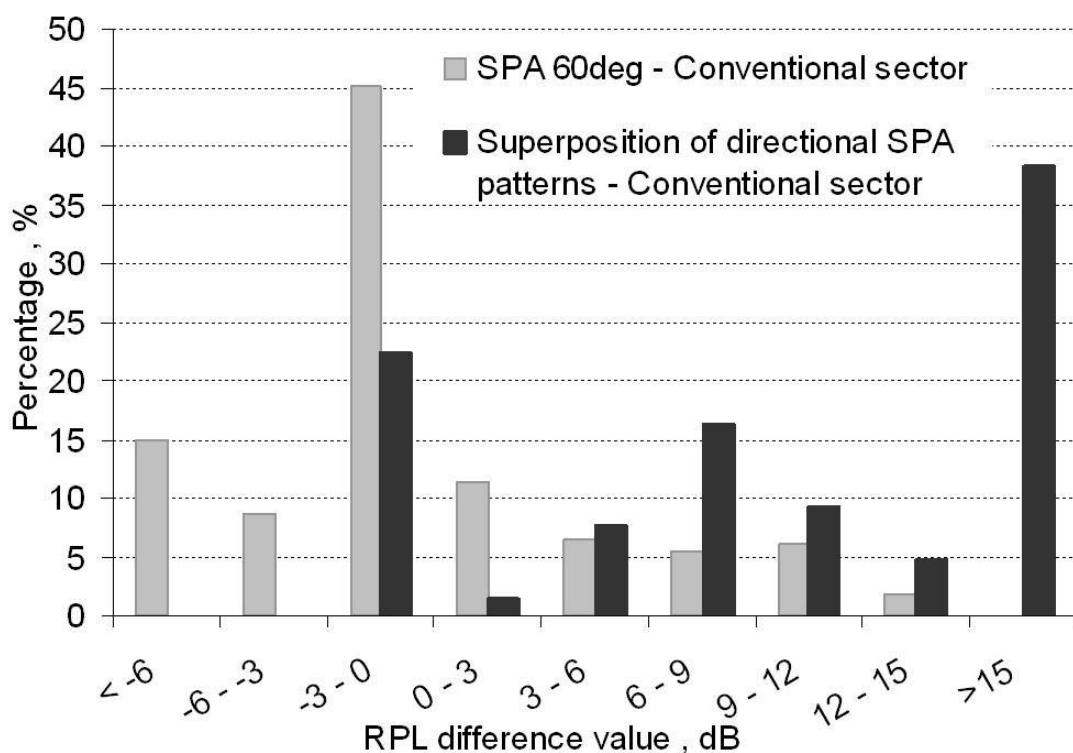
Σχήμα 6.17 Συνολικά αποτελέσματα για ΣΒ που καλύπτει κεντρικό δρόμο

Περισσότερο από το 86% επί του συνόλου των υποεπιφανειών παρουσιάζουν διαφορά λήψης από -6dB έως 6dB. Επομένως, η κάλυψη των δύο κεραιοσυστημάτων, στην περίπτωση μετάδοσης σηματοδοσίας, είναι συγκρίσιμη με το συμβατικό κεραιοσύστημα να υπερέχει ελαφρά. Παρά το τελευταίο, στην περίπτωση μετάδοσης δεδομένων η κάλυψη που προσφέρεται από τα κατευθυντικά διαγράμματα είναι σημαντικά ενισχυμένη. Οι μαύρες μπάρες δηλώνουν την κατανομή της μέσης τιμής της διαφοράς στη στάθμη λήψης του προτεινόμενου κεραιοσυστήματος με ρύθμιση κάλυψης μετάδοσης δεδομένων RPLSPAdirectional και του συμβατικού κεραιοσυστήματος RPLCONV. Η διαφορά αυτή ορίζεται ως RPLSPAdirectional – RPLCONV. Παρατηρείται μια θεαματική αύξηση της τάξης περισσότερο του 38% στις υποπεριοχές με διαφορά στη στάθμη λήψης μεγαλύτερη των 15dB. Επιπλέον, 76% των υποπεριοχών παρουσιάζουν διαφορά στάθμης λήψης μεγαλύτερη των 3dB.

Ο βασικός παράγοντας που οδηγεί σε αυξημένη περιοχή κάλυψης είναι η κατευθυντικότητα των διαγραμμάτων. Ένας πιθανός τρόπος αξιοποίησης της παραπάνω παρατήρησης είναι η εφαρμογή πολλαπλών σχημάτων διαμόρφωσης σε

συνδυασμό με το προτεινόμενο κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης. Το σχήμα διαμόρφωσης 4-QAM αποτελεί μια ασφαλή επιλογή για τη μετάδοση της σηματοδοσίας με ρύθμισή της κεραίας για κάλυψη 60° ενώ διαμόρφωση 16-QAM ή ακόμη και 64-QAM μπορεί να εφαρμοστεί για τη μετάδοση των δεδομένων και το κεραιοσύστημα ρυθμισμένο σε ένα από τα τρία κατευθυντικά διαγράμματα.

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης δημοσιεύτηκαν στο συνέδριο IEEE International Workshop on Antenna Technology Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications [21].



Σχήμα 6.18 Συνολικά αποτελέσματα για τα τρία σενάρια

## 6.5 Συμπεράσματα

Το κεραιοσύστημα που δοκιμάστηκε σε σταθμό βάσης δικτύου ευρυζωνικής πρόσβασης είναι τεσσάρων (4) δεσμών με έξι (6) ενεργά/ παρασιτικά στοιχεία και δύο ανακλαστικές επιφάνειες. Τα πλεονεκτήματα από την εγκατάσταση ενός τέτοιου κεραιοσυστήματος σε σταθμό βάσης ευρυζωνικών υπηρεσιών είναι φανερό καθώς η περιοχή κάλυψης ειδικά στην περίπτωση μετάδοσης δεδομένων, είναι σημαντικά



αυξημένη. Για το κεραιοσύστημα χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό γενετικός αλγόριθμος. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ανέδειξαν ότι η εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος σε σταθμό βάσης σε συνδυασμό με πολλαπλά σχήματα διαμόρφωσης τα οποία θα εναλλάσσονται ανάλογα με τις συνθήκες διάδοσης, μπορούν να αυξήσουν την κάλυψη του σταθμού αλλά και τους ρυθμούς μετάδοσης με έμμεσο τρόπο.

## 6.6 Βιβλιογραφία

- 1 S. Pietrzyk, *OFDMA for Broadband Wireless Access*, Artech House, 2006
- 2 O. C. Ibe, *Fixed Broadband Wireless Access Networks and Services*, John Wiley & Sons, 2002
- 3 W. Webb, *Introduction to Wireless Local Loop*, Artech House, 1998
- 4 M. P. Clark, *Wireless Access Networks: Fixed Wireless Access and WLL Networks -- Design and Operation*, John Wiley & Sons, 2000
- 5 C. Jonietz, W. H. Gerstacker and R. Schober, "Transmission and Reception Concepts for WLAN IEEE 802.11b", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, issue 12, pp. 3375 – 3381, December 2006
- 6 M. Gast, *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*, Second Edition, O' Reilly Media, 2005
- 7 F. Ohrtman and K. Roeder, *Wi-Fi Handbook: Building 802.11b Wireless Networks*, Mc Graw Hill, 2003
- 8 IEEE std 802.11b-1999
- 9 M. Ganguli, *Getting Started with Bluetooth*, Premier Press, 2002
- 10 J. Kardach, "Bluetooth Architecture Overview", Technical presentation, doc. IEEE 802.11-99/53, 1998
- 11 IEEE std 802.11-2007
- 12 J. Khun-Jush, "System Overview of HiperLAN Type 2: A Presentation to the plenary of IEEE 802.15 Working Group July 12, 2000, San Diego", Technical presentation, doc. IEEE 802.15-00/238r0, 2000
- 13 HomeRF working group, "Home networking technologies", Technical report, 2001
- 14 HomeRF working group, "Wireless networking choises for the broadband internet home", Technical report, 2001

- 15 F. Orhtman, *WiMAX Handbook: Building 802.16 Wireless Networks*, McGraw-Hill, 2005
- 16 A. Nordbotten, "LMDS systems and their application", *IEEE Communications Magazine*, vol 38, issue 6, pp 150-154, 2000
- 17 A. I. Sotiriou, P. T. Trakadas and C. N. Capsalis, "Uplink Carrier to Interference improvement in a cellular telecommunication system when a six-beam switched parasitic array is implemented", *Progress In Electromagnetics Research B (PIER B)*, vol.5, pp.303-321, 2008
- 18 K. Sheikh, D. Gesbert, D. Gore and A. Paulraj, "Smart antennas for broadband wireless access networks", *IEEE Communications magazine*, pp. 100-105, November 1999
- 19 802.16a IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 16 Air interface for fixed broadband wireless access systems
- 20 H. Bolcskei, A. Paulraj, K. Hari, R. Nabar and W. Lu, "Fixed broadband wireless access: State of the art, challenges and future directions", *IEEE Communications Magazine*, pp.100-108, January 2001
- 21 A. I. Sotiriou, P. K. Varlamos, P. T. Trakadas, C. N. Capsalis, "Broadband Wireless Access Base Station Performance using Smart Antenna Cell", 2007 IEEE International Workshop on Antenna Technology Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications, 21st-23rd March, 2007, Cambridge, U.K





## ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το κύριο αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη της επίδρασης από την εφαρμογή των ευφών κεραιοσυστημάτων σε κυψελωτά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας. Γίνεται επίσης ανάλυση και σχολιασμός από πιλοτικές εφαρμογές και τα αποτελέσματά τους. Είναι γενικά αποδεκτό ότι τα ευφυή κεραιοσυστήματα αποτελούν μια πολύ σημαντική παράμετρο των σύγχρονων ασυρμάτων συστημάτων επικοινωνιών παρά τις δυσκολίες που παρουσιάζονται για μαζική εγκατάσταση σε σταθμούς βάσης λόγω του υψηλού κόστους. Στα κυριότερα πλεονεκτήματά τους συγκαταλέγονται τα εξής:

- Αύξηση της χωρητικότητας του τηλεπικοινωνιακού συστήματος
- Βελτίωση της περιοχής κάλυψης του σταθμού βάσης
- Αύξηση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων
- Αύξηση ασφάλειας
- Εκμετάλλευση των φαινομένων που σχετίζονται με τη ραδιοδιάδοση (π.χ., multipath) με στόχο την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης
- Ανίχνευση παραμέτρων του καναλιού (π.χ., γωνίες άφιξης)
- Οικονομικά οφέλη σχετικά με το σχεδιασμό των ασυρμάτων δικτύων καθώς λιγότεροι σταθμοί βάσης απαιτούνται για την κάλυψη μιας περιοχής
- Γενική βελτίωση της παρεχόμενης υπηρεσίας στους συνδρομητές

Στην παρούσα διατριβή δίνεται ιδιαίτερο βάρος σε δύο είδη τηλεπικοινωνιακών συστημάτων: στο κυψελωτό ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα στενού εύρους φάσματος (narrowband system) και στο κυψελωτό ευρυζωνικό ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα σημείου προς πολλαπλά σημεία (point to multipoint broadband system). Τα δύο αυτά είδη είναι τα πλέον διαδεδομένα και έχουν πλήθος εφαρμογών παγκοσμίως. Τα μεγέθη στα οποία επικεντρώθηκε η μελέτη σχετικά με την εφαρμογή ευφών κεραιοσυστημάτων σε αυτά τα δίκτυα, είναι ο ρυθμός λαθών στην επικοινωνία σταθμού βάσης και τερματικού σταθμού καθώς και ο λόγος σήματος προς παρεμβολές τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη.

Το ευφές κεραιοσύστημα που θεωρήθηκε είναι μια κεραία που ανήκει στην οικογένεια κεραιών στρεφόμενου λοβού (switched beam). Η ιδιαιτερότητα της κεραίας που χρησιμοποιήθηκε είναι ότι αποτελείται από ενεργά και παρασιτικά στοιχεία. Οι τελευταίες επιτυγχάνουν την ηλεκτρονική στροφή του διαγράμματος

ακτινοβολίας, με την εισαγωγή κατάλληλης ψηφιακής λέξης στο κύκλωμα τροφοδοτήσής τους. Η ψηφιακή λέξη αναφέρεται στο συνδυασμό των ενεργών (τροφοδοτούμενων) και παρασιτικών (βραχυκυκλωμένων) στοιχείων της στοιχειοκεραίας. Η μετάβαση μεταξύ των δύο καταστάσεων για όλα τα στοιχεία καθίσταται εφικτή μέσω κατάλληλων RF διακοπών. Επιλέχθηκε αυτού του τύπου η κεραία καθώς έχει απλή αρχιτεκτονική, μικρό κόστος κατασκευής και μπορεί να αποτελέσει ελκυστική λύση σε ένα πιθανό σενάριο αντικατάστασης των συμβατικών κεραιοσυστημάτων με ευφυή.

Οι αλγόριθμοι εκτίμησης γωνιών άφιξης αποτελούν σημαντικό εργαλείο για την πλήρη αποκωδικοποίηση των μηχανισμών ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης στο τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Τρεις κατηγορίες τεχνικών υπάρχουν που βασίζονται στη δομή πινάκων (array based): τεχνική συμβατικής διαμόρφωσης δέσμης και φασματικής εκτίμησης, τεχνικές που βασίζονται στη θεωρία των υποχώρων ή ιδιοτιμών και μέθοδοι μέγιστης πιθανοφάνειας. Στην μελέτη που έχει γίνει περιγράφεται ο αλγόριθμος MUSIC ένας αλγόριθμος που εντάσσεται στην κατηγορία των τεχνικών υποχώρων ή ιδιοτιμών. Επίσης αναλύονται δύο νέες μέθοδοι εκτίμησης γωνιών άφιξης για κεραιοσυστήματα ενεργών παρασιτικών στοιχείων, η μία βασισμένη στον αλγόριθμό MUSIC και η δεύτερη βασισμένη σε γενετικό αλγόριθμο.

## **ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΣΗΜΕΙΑ ΠΟΥ ΠΡΟΑΓΕΤΑΙ Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ**

- ❖ Οι αλγόριθμοι εκτίμησης της γωνίας άφιξης των σημάτων οδηγούν στην πλήρη γνώση των μηχανισμών ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης στο τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Τα στοιχεία αυτά είναι ιδιαίτερα κρίσιμα για τον δέκτη ώστε να γίνει σωστή ανάγνωση των δεδομένων ακόμη και αν αυτά έχουν υποστεί αλλοίωση από τις συνθήκες διάδοσης.
- ❖ Μια παραλλαγή του αλγόριθμου MUSIC αναπτύχθηκε με στόχο να έχει εφαρμογή για κεραιοσυστήματα ενεργών παρασιτικών στοιχείων. Η μεγάλη αλλαγή σε σχέση με τον κλασικό MUSIC εντοπίζεται στον πίνακα στροφής, ο οποίος στην περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στον πίνακα απολαβής για κάθε διάγραμμα ακτινοβολίας του κεραιοσυστήματος.

- ✓ Για τις προσομοιώσεις θεωρήθηκαν δύο κεραιοσυστήματα: μια κεραία Switched Parasitic Planar Array 7 στοιχείων και μια κεραία Switched Parasitic Circular Array 6 στοιχείων. Τα δυο αυτά κεραιοσυστήματα καλύπτουν ακτινοβολία 360 μοιρών με 6 διαφορετικά διαγράμματα (NRP=6).
  - ✓ Κάθε προσομοίωση στόχευε στην ανάλυση δύο εισερχομένων σημάτων, με μέση τιμή ισχύος από 0 έως 7dB και γωνίες άφιξης που ακολουθούσαν κανονική ή κάποια άλλη κατανομή.
  - ✓ Η κεραία 7 στοιχείων παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την κεραία 6 στοιχείων για ίδιο επίπεδο θορύβου.
  - ✓ Μειώνοντας τη σχετική μέση τιμή ισχύος του θορύβου και αυξάνοντας τα δείγματα εισόδου, η πιθανότητα επιτυχίας ασυμπτωτικά αγγίζει τη μονάδα και για τα δύο κεραιοσυστήματα.
  - ✓ Αυξάνοντας το πλήθος των διαγραμμάτων ακτινοβολίας για κάλυψη 360°, αυξάνεται η πιθανότητα επιτυχίας.
- ❖ Η δεύτερη μέθοδος που έχει αναπτυχθεί για κεραιοσυστήματα ενεργών παρασιτικών στοιχείων αναλύει τα δύο δυνατότερα σήματα σε ένα ευρυζωνικό πολυδιαδρομικό περιβάλλον και τη σχετική ισχύ τους με τη βοήθεια γενετικών αλγόριθμων. Η ανάλυση επικεντρώνεται στα δύο πιο δυνατά σήματα, από τις αντίστοιχες κατευθύνσεις, και θεωρεί το σύνολο των υπολοίπων σημάτων ως θόρυβο. Δεδομένης της δυνατότητας ελέγχου των διαγραμμάτων με τις ψηφιακές κωδικολέξεις, η συνολική λαμβανόμενη ισχύς για κάθε διάγραμμα είναι δυνατόν να καταγραφεί διαδοχικά. Από την πληροφορία αυτή ο στόχος είναι να καθοριστούν τα πλάτη  $s_1, s_2$  των δύο ισχυρότερων εισερχομένων σημάτων και οι αντίστοιχες γωνίες εισόδου  $\phi_1, \phi_2$ .
- ✓ Η εκτίμηση για τη γωνία άφιξης και τη σχετική ισχύ των δύο ισχυρότερων σημάτων είναι βασισμένη σε τεχνική βελτιστοποίησης με χρήση γενετικού αλγόριθμου.

- ✓ Κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού αντιστοιχίζεται σε πιθανές τιμές γωνιών άφιξης των δύο ισχυρών σημάτων  $\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2$  από τις οποίες μπορεί να υπάρξει μια πρώτη εκτίμηση για την λαμβανόμενη ισχύ των δύο εν λόγω σημάτων.
- ✓ Εφόσον η συνολικά λαμβανόμενη ισχύς  $P_1, P_2$ , για τα διαγράμματα ακτινοβολίας 1, 2, έχει καταμετρηθεί και είναι γνωστή, το κέρδος της κεραίας  $G_i(\phi)$  είναι επίσης γνωστό για όλα τα διαγράμματα, γίνεται εκτίμηση για την επιμέρους ισχύ των σημάτων  $\hat{s}_1$  και  $\hat{s}_2$ .
- ✓ Στο επόμενο βήμα γίνεται εκτίμηση των υπολοίπων  $NRP - 2$  συνολικά λαμβανόμενων ισχύων χρησιμοποιώντας τις τιμές  $\hat{s}_1, \hat{s}_2$  και  $\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2$
- ✓ Όταν κάποιο από τα  $\hat{P}_i$  γίνει ίσο με το μετρούμενο  $P_i$  ( $i=3, \dots, NRP$ ), οι τιμές  $\hat{s}_1, \hat{s}_2$  και  $\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2$ , αποτελούν τη λύση του προβλήματος.
- ✓ Κάθε προσομοίωση στόχευε στην ανάλυση δύο εισερχομένων σημάτων, με μέση τιμή ισχύος από 0 έως 7dB και γωνίες άφιξης που ακολουθούσαν κανονική ή κάποια άλλη κατανομή.
- ✓ Ο γενετικός αλγόριθμος δομήθηκε με 400 γενιές των 50 χρωμοσωμάτων η κάθε μία,  $p_{crossover}=0.8$ , και  $p_{mutation}=0.1$ . Οι υπόλοιπες παράμετροι: roulette wheel selection, simple crossover και binary mutation.
- ✓ Τα λαμβανόμενα σήματα από κατευθύνσεις διαφορετικές αυτών του ενδιαφέροντος, θεωρήθηκαν θόρυβος με μέση συνολική ισχύ ίση με -20dB ή -50dB, συγκρινόμενη με το ασθενέστερο σήμα.
- ✓ Για τις προσομοιώσεις θεωρήθηκαν δύο κεραιοσυστήματα: μια κεραία Switched Parasitic Planar Array 7 στοιχείων και μια κεραία Switched Parasitic Circular Array 6 στοιχείων. Τα δυο αυτά κεραιοσυστήματα καλύπτουν ακτινοβολία 360 μοιρών με 6 διαφορετικά διαγράμματα ( $NRP=6$ ).



- ✓ Η κεραία 7 στοιχείων παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την κεραία 6 στοιχείων για ίδιο επίπεδο θορύβου.
- ✓ Το ποσοστό επιτυχίας και για τα δύο κεραιοσυστήματα κυμαίνεται άνω του 88% για χαμηλά επίπεδα θορύβου.
- ❖ Στην παρούσα διατριβή αναπτύχθηκαν τα βασικά πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση ευφυούς κεραιοσυστήματος 7 διπόλων ενεργών παρασιτικών στοιχείων, επιλογής δέσμης, έξι διαγραμμμάτων ακτινοβολίας σε σχέση με τη χρησιμοποίηση συμβατικής ομοιοκατευθυντικής κεραίας σε κυψελωτό ασύρματο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο στενού εύρους φάσματος.
- ✓ Ο ρυθμός λαθών (BER), στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink) αποτελεί το κριτήριο και το δείκτη για την ανάδειξη της βελτιωμένης ποιοτικά συμπεριφοράς της κεραίας.
  - Ο σταθμός βάσης θεωρείται τύπου macro ενώ οι χρήστες ενδιαφέροντος αλλά και οι χρήστες-παρεμβολείς, θεωρούνται τυχαία κατανεμημένοι στην ευρύτερη περιοχή που καλύπτει ο σταθμός.
  - Το σχήμα διαμόρφωσης είναι BPSK με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων από 256 kbps έως 2048 kbps.
  - Το διαμορφωμένο σήμα, πριν γίνει η εκπομπή, περνά από ένα root Nyquist φίλτρο με roll-off factor ίσο με 0.5.
  - Στην πλευρά του δέκτη, το ίδιο φίλτρο χρησιμοποιείται πριν γίνει η αποδιαμόρφωση του σήματος. Επιπρόσθετα, το TDMA πλαίσιο αποτελείται από 200 bits/frame περιλαμβανομένης και της ακολουθίας εκπαίδευσης (training sequence) που αποτελείται από 26 bits. Να σημειωθεί ότι θεωρήθηκαν οι ακολουθίες εκπαίδευσης του συστήματος κινητής τηλεπικοινωνίας GSM.

- Σε όλες τις προσομοιώσεις θεωρήθηκε ότι για τους χρήστες-παρεμβολείς ο λόγος ενέργειας bit προς το θόρυβο ( $E_b/N_0$ ) είναι ίσος με 15dB, ενώ για τους χρήστες ενδιαφέροντος η αντίστοιχη τιμή κυμαινόταν από 2dB μέχρι 20dB.
- Η απόφαση για την ενεργή δέσμη παίρνεται με βάση την ακόλουθη διαδικασία : η λαμβανόμενη ακολουθία εκπαίδευσης από κάθε διάγραμμα ακτινοβολίας συσχετίζεται με τη γνωστή και αναμενόμενη ακολουθία εκπαίδευσης του χρήστη. Η συσχέτιση που δίνει τη μέγιστη τιμή, καθορίζει το ενεργό διάγραμμα ακτινοβολίας.
- Η επίδοση του κεραιοσυστήματος αξιολογήθηκε στα πλαίσια δύο διαφορετικών σεναρίων συνθηκών διάδοσης: κανάλι προσθετικού θορύβου AWGN και κανάλι Rayleigh μιας διαδρομής (one-path Rayleigh flat fading channel) με προσθετικό θόρυβο AWGN.
- Για το σενάριο όπου θεωρήθηκε μόνο προσθετικός θόρυβος AWGN, ο σταθμός βάσης προσομοιώθηκε να λαμβάνει μόνο το 20% της εκπεμπόμενης ισχύος του σήματος παρεμβολής. Επομένως η επίδραση στα δεδομένα του χρήστη ενδιαφέροντος, αρχικά θεωρήθηκε χαμηλή.
- Ο ρυθμός λαθών που παρουσιάζεται, είναι σημαντικά μειωμένος όταν ο σηματοθορυβικός λόγος κυμαίνεται από 2dB μέχρι 6 dB. Στην περιοχή αυτών των τιμών, ο ρυθμός λαθών είναι ελαφρά πιο αυξημένος από το ρυθμό λαθών που παρουσιάζεται με απουσία σημάτων παρεμβολής.
- Για τιμές του  $E_b/N_0$  μεγαλύτερες των 8dB, η τιμή του BER είναι τουλάχιστον δύο φορές μικρότερη σε σχέση με την τιμή για την περίπτωση της ομοιοκατευθυντικής κεραίας.
- Για το σενάριο Rayleigh και AWGN, θεωρήθηκε ότι ο σταθμός βάσης λαμβάνει 60% από την εκπεμπόμενη ισχύ του σήματος παρεμβολής.

- Οι χρήστες θεωρήθηκε ότι κινούνται με ταχύτητα 72 Km/h, ενώ η συχνότητα εκπομπής θεωρήθηκε ίση με 2.4 GHz. Τα δύο τελευταία στοιχεία οδηγούν σε συχνότητα Doppler  $f_D$  ίση με 160 Hz.
- Ο ρυθμός λαθών BER είναι μειωμένος μέχρι και 50%, καθιστώντας εξαιρετικά βελτιωμένη την ποιοτική συμπεριφορά του τηλεπικοινωνιακού συστήματος.
- ✓ Ο ρυθμός σήματος προς παρεμβολή (CIR) στην ανερχόμενη ζεύξη, αποτελεί το κριτήριο και το δείκτη για την ανάδειξη της βελτιωμένης ποιοτικά συμπεριφοράς της κεραίας.
  - Ένα δίκτυο από 19 σταθμούς βάσης επιλέχθηκε, οι σταθμοί θεωρήθηκαν εξοπλισμένοι με το προτεινόμενο κεραιοσύστημα και το μικρό αυτό δίκτυο διαστασιοποιήθηκε με cluster size ίσο με 3.
  - Η ακτίνα της περιοχής κάλυψης για τους σταθμούς βάσης ήταν μεταβλητή και καθορίστηκε στα 30m για το σενάριο του picocell, 100m για την περίπτωση microcell, 500m για την περίπτωση midicell και 1-3Km για την περίπτωση macrocell.
  - Για όλες τις περιπτώσεις θεωρήθηκε ότι τα κινητά τερματικά είχαν και δεν είχαν ενεργοποιημένη τη συνθήκη ελέγχου εκπεμπόμενης ισχύος (power control και no power control συνθήκη).
  - Η παρατηρούμενη βελτίωση στο λόγο CIR κυμαίνεται από 4 dB μέχρι 13dB όταν θεωρηθεί το κεραιοσύστημα στο σταθμό βάσης για όλους τους τύπους των σταθμών βάσης.
  - Η παράμετρος down tilt είναι ένας σημαντικός παράγοντας αποφυγής των παρεμβολικών σημάτων. Το γεγονός ήταν αναμενόμενο καθώς όσο πιο μεγάλο είναι το down tilt τόσο περισσότερο επικεντρώνεται η

περιοχή κάλυψης. Στις προσομοιώσεις παρατηρήθηκε ότι αυξάνοντας το down tilt αυξάνεται και η βελτίωση στο λόγο CIR.

- Η εφαρμογή της τεχνικής διαμόρφωσης δέσμης και στα δυο άκρα του τηλεπικοινωνιακού συστήματος επιφέρει μια σημαντική βελτίωση στην ποιότητα του τηλεπικοινωνιακού καναλιού.
  - Στην περίπτωση του pico cell, χωρίς τη συνθήκη ελέγχου εκπεμπόμενης ισχύος, η βελτίωση του CIR είναι της τάξης των 6dB περίπου. Για την ίδια περίπτωση αλλά με ενεργοποιημένη τη συνθήκη εκπεμπόμενης ισχύος, υπάρχει μια επιπλέον βελτίωση του λόγου CIR που κυμαίνεται από 7dB-12dB. Υπολογίζοντας λοιπόν τη συνολική αύξηση του CIR που επέρχεται στο τηλεπικοινωνιακό κανάλι, φαίνεται να κυμαίνεται από 18dB-20dB. Παρόμοιες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν και για τις υπόλοιπες περιπτώσεις όπου το κεραιοσύστημα εφαρμόζεται στο σταθμό βάσης και τον τερματικό σταθμό
- ✓ Ο ρυθμός σήματος προς παρεμβολή (CIR) στην κατερχόμενη ζεύξη, αποτελεί το κριτήριο και το δείκτη για την ανάδειξη της βελτιωμένης ποιοτικά συμπεριφοράς της κεραίας.
- Όλες οι παράμετροι παραμένουν ίδιες σε σχέση με τις προσομοιώσεις στην ανερχόμενη ζεύξη.
  - Τα αποτελέσματα είναι ανάλογα με αυτά της ανερχόμενης ζεύξης.
- ✓ Η βελτίωση του CIR στην ανερχόμενη και στην κατερχόμενη ζεύξη κυμαίνεται από 10 dB μέχρι και 20 dB.
- ❖ Στην παρούσα διατριβή αναπτύχθηκαν τα βασικά πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση ευφυούς κεραιοσυστήματος 6 διπόλων ενεργών παρασιτικών στοιχείων, επιλογής δέσμης, τεσσάρων διαγραμμάτων ακτινοβολίας σε σχέση με

τη χρησιμοποίηση συμβατικής ομοιοκατευθυντικής κεραίας σε ευρυζωνικό ασύρματο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο σημείου προς πολλαπλά σημεία.

- ✓ Στόχος του σχεδιασμού της κεραίας είναι η κάλυψη μιας κυψέλης ευρυζωνικού σταθμού βάσης, εύρους 60ο με τρεις διαφορετικές κατευθυντικές δέσμες κάθε μια από τις οποίες με κέρδος 18 dBi. Αυτές οι τρεις δέσμες επί της ουσίας δημιουργούν τρεις υποκυψέλες και θα χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων προς τον τερματικό χρήστη. Μια τέταρτη δέσμη με κάλυψη σε όλη την κυψέλη και κέρδος ίσο με 15 dBi θα χρησιμοποιείται για τη μετάδοση της σηματοδοσίας.
- ✓ Επτά μητροπολιτικοί ευρυζωνικοί σταθμοί βάσης επιλέχθηκαν για την προσομοίωση και αξιολόγηση της βελτίωσης στα στοιχεία του τηλεπικοινωνιακού συστήματος.
- ✓ Οι σταθμοί τοποθετήθηκαν σε κεντρικά σημεία της πόλης και κατά μήκος μεγάλων οδικών αξόνων.
- ✓ Ύψος εγκατάστασης του κεραιοσυστήματος στο σταθμό βάσης: 45m-150m (από την επιφάνεια της θάλασσας), Μηχανικό downtilt: 2ο, Ισχύς εκπομπής: 17dBm, Σχήμα διαμόρφωσης: 4-QAM, Κεραιοσύστημα τερματικού σταθμού: παραβολικά κεραία κέρδους 18dBi, Ύψος εγκατάστασης του κεραιοσυστήματος στον τερματικό σταθμό: 3m (από την απόληξη του κτιρίου), Κάθετη πόλωση, Ακτίνα κάλυψης 2Km-5Km, Συχνότητα: 3,5GHz
- ✓ Περισσότερο από το 86% επί του συνόλου των σημείων κάλυψης παρουσιάζουν διαφορά λήψης από -6dB έως 6dB. Επομένως, η κάλυψη των δύο κεραιοσυστημάτων, στην περίπτωση μετάδοσης σηματοδοσίας, είναι συγκρίσιμη με το συμβατικό κεραιοσύστημα να υπερέχει ελαφρά.
- ✓ Για τη μετάδοση δεδομένων, παρατηρείται μια θεαματική αύξηση της τάξης περισσότερο του 38% στα σημεία κάλυψης με διαφορά στη στάθμη λήψης μεγαλύτερη των 15dB όταν θεωρείται το προτεινόμενο κεραιοσύστημα.

- ✓ 76% των σημείων κάλυψης παρουσιάζουν διαφορά στάθμης λήψης μεγαλύτερη των 3dB με το προτεινόμενο κεραιосύστημα.
- ✓ Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ανέδειξαν ότι η εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος σε σταθμό βάσης σε συνδυασμό με πολλαπλά σχήματα διαμόρφωσης τα οποία θα εναλλάσσονται ανάλογα με τις συνθήκες διάδοσης, μπορούν να αυξήσουν την κάλυψη του σταθμού αλλά και τους ρυθμούς μετάδοσης με έμμεσο τρόπο.

## **ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ**

- Η τεχνολογία της ψηφιακής επίγειας τηλεόρασης τόσο για σταθερούς δέκτες Digital Video Broadcasting Terrestrial DVB-T όσο και για κινητούς δέκτες Digital Video Broadcasting Handheld DVB-H αναπτύσσεται ταχύτατα τα τελευταία χρόνια. Οι τηλεοπτικοί σταθμοί είναι υποχρεωμένοι να περάσουν από την απλή αναλογική εκπομπή στην ψηφιακή τεχνολογία σε σύντομο χρονικό διάστημα από σήμερα. Οι κεραιές ενεργών παρασιτικών στοιχείων, δεδομένης της κατευθυντικότητας που παρουσιάζουν, μπορούν να έχουν πεδίο εφαρμογής στους σταθμούς εκπομπής της ψηφιακής τηλεόρασης. Επιπρόσθετα, με την κατάλληλη βελτιστοποίηση των διαστάσεών τους, οι κεραιές ενεργών παρασιτικών στοιχείων μπορούν να έχουν εφαρμογή στους σταθερούς και κινούμενους δέκτες.
- Πλήθος επίπεδων, συμμετρικών και μη-συμμετρικών, κεραιών διπόλων ενεργών-παρασιτικών στοιχείων, μπορούν να αποτελέσουν τη βάση συστημάτων MIMO, για την επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης. Η μελέτη της χωρητικότητας συστήματος MIMO με διάφορους τύπους ευφών στοιχειοκεραιών μεταγωγής ενεργών και παρασιτικών διπόλων είναι δυνατό να οδηγήσει σε χρήσιμες συγκρίσεις και συμπεράσματα.
- Η τεχνολογία FEMTO cells βασίζεται στη χρήση μικροκυψελών που προσφέρουν καλύτερη κάλυψη στις κατοικημένες περιοχές και σε εσωτερικούς χώρους, ενώ δίνουν τη δυνατότητα παροχής πρόσθετων υπηρεσιών προς τους χρήστες, όπως τηλεοπτικές υπηρεσίες μέσω διαδικτύου.

Οι κεραίες μεταγωγής ενεργών παρασιτικών στοιχείων προσφέρουν μια προσιτή λύση για το FEMTO cell και θα ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέρον να γίνει μια σύγκριση της απόδοσης του συστήματος όταν θεωρείται ένα κλασικό κεραιοσύστημα και οι προτεινόμενες κεραίες.

- Μια τεχνολογία που βασίζεται στις κεραίες ενεργών παρασιτικών στοιχείων είναι οι ESPAR Electronically Switched Parasitic Arrays. Τα συγκεκριμένα κεραιοσυστήματα είναι ηλεκτρονικά ελεγχόμενα και έχουν ένα μόνο ενεργό στοιχείο. Τα παρασιτικά στοιχεία είναι συνδεδεμένα με μεταβαλλόμενα φορτία τα οποία και ανάλογα με τις τιμές που λαμβάνουν, προσδιορίζουν το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας. Η επίδραση ενός τέτοιου κεραιοσυστήματος σε κυψελωτό ασύρματο δίκτυο επικοινωνίας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

